annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CENTRE DE GRIGNON - CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

Bimestriel

1977

Vol. 28 . N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1977, **28** (1), 1-43.

Étude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montomorillonite-diols [1]

Partie II. — Influence des diols sur les propriétés d'hydratation de la montmorillonite

P. CHASSIN

Station de Science du Sol, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Les isothermes d'adsorption d'eau des complexes montmorillonite-diols montrent que ces molécules organiques induisent soit des phénomènes de compétition interfoliaire (substitution de l'eau interfoliaire par le diol), soit des phénomènes de rétention interagrégat (hydratation du diol non adsorbé). Il a été montré que l'intensité relative de ces deux actions antagonistes des diols dépend de la quantité de matière organique apportée, du poids moléculaire du diol et de l'humidité relative à laquelle l'équilibre a été obtenu.

Après avoir donné une interprétation générale de l'hydratation de ces complexes et en raisonnant par analogie, un modèle d'action des substances humiques sur les propriétés des sols est proposé. Enfin, l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail permet de :

— souligner l'importance de l'espace interagrégat dans les mécanismes d'hydratation des argiles.

— attirer l'attention sur les difficultés d'interprétation des résultats donnés par la méthode classique utilisée pour la détermination de l'aire de la surface totale d'une argile,

— préciser la conformation des polymères à l'état adsorbé quand le taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant augmente.

Chapitre IV. Etude des systèmes prétraités

Il est maintenant bien établi que la présence de matières organiques dans un sol entraîne de nombreuses modifications de ses propriétés, notamment en agissant sur les quantités d'eau retenues. Dans cette partie, on étudiera les propriétés d'hydratation de la montmorillonite calcique de Camp Berteau (Maroc) contenant des quantités variables de diols préalablement adsorbés, modélisant ainsi les minéraux argileux du sol toujours associés à des composés organiques présents en plus ou moins grande quantité.

(1) La première partie de ce travail est parue dans les Annales agronomiques 1976, **27** (4), p. 367-415.

On appellera ces associations « Systèmes prétraités » par opposition aux systèmes décrits dans le précédent mémoire que l'on dénommera « Systèmes non traités. »

Après avoir présenté les résultats obtenus avec les diols de faible poids moléculaire (éthanediol, propanediols, butanediols, di et triéthylèneglycol), on généralisera cette étude à l'argile contenant une macromolécule, le polyéthylèneglycol dont le poids moléculaire est voisin de 20 000. Par la suite, on désignera cette macromolécule sous le nom de polyéthylèneglycol 20 000 (PEG 20 000).

4.1. — *Etude de l'hydratation de la montmorillonite calcique contenant initialement* 25 p. 100 *de diol*

(éthane 1,2 diol, propane 1,2 et 1,3 diol, butane 1,4, 1,3 et 2,3 diol, diéthylèneglycol et triéthylèneglycol)

L'argile contenant 25 p. 100 de produit organique est placée dans la phase vapeur délivrée par une solution eau-diol caractérisée par sa fraction molaire. Après obtention de l'équilibre, on détermine, comme précédemment, les quantités respectives d'eau et de diol retenues par l'argile.

Les résultats obtenus avec l'éthane 1,2 diol et ses homologues supérieurs (propane 1,2 et 1,3 diol ; butane 1,4, 1,3 et 2,3 diol) se différencient de ceux obtenus avec les premiers termes de la série des polyéthylèneglycols (diéthylèneglycol, triéthylèneglycol). Dans cette partie, on ne présentera que les isothermes d'adsorption des systèmes prétraités avec l'éthane 1,2 diol ou le diéthylèneglycol car ils sont représentatifs de tous les autres. Les différentes isothermes sont rassemblées en annexe.

La figure 28 représente les quantités d'eau et d'éthane 1,2 diol fixées par les systèmes non traités et prétraités. Sur ce graphique, la courbe 5 représente l'isotherme d'adsorption d'eau de la montmorillonite calcique en absence de matière organique. On remarque immédiatement que l'argile contenant 25 p. 100 d'éthane 1,2 diol préalablement adsorbé, présente 2 comportements différents selon la composition de la solution d'équilibre :

— Dans un cas, on assiste à une nouvelle fixation d'éthane 1,2 diol et on obtient les mêmes états d'équilibre que pour les systèmes non traités. Cette situation apparaît pour des fractions molaires en eau de la solution d'équilibre inférieures à 0.75, c'est-à-dire dans tout le domaine où les quantités d'éthane 1,2 diol, trouvées à l'équilibre sur les systèmes non traités, sont supérieures à 25 p. 100.

— Dans l'autre cas, on ne retrouve pas les états d'équilibre des systèmes non traités, mais on observe que le contenu en eau et en diol est toujours supérieur. Cette situation apparaît pour des fractions molaires en eau de la solution d'équilibre supérieure à 0,75.

On note également que la divergence entre les systèmes non traités et prétraités apparaît, pour les fixations de l'eau et du diol, à la même fraction molaire de la solution d'équilibre. Il en résulte que les quantités d'eau et de diol retenues par la montmorillonite calcique contenant 25 p. 100 d'éthane 1,2 diol préalablement adsorbé,

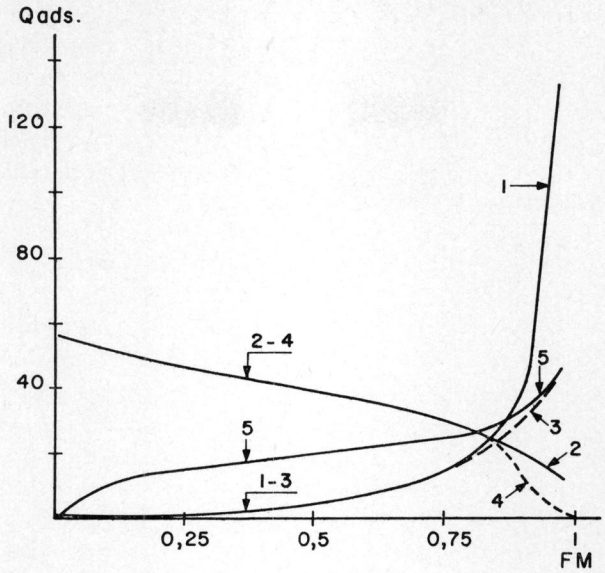


FIG. 28. — *Quantités d'eau (courbe 1) et d'éthane 1,2 diol (courbe 2) retenues par les systèmes prétraités (les courbes 3 et 4 représentent les états d'équilibre observés sur les systèmes non traités alors que la courbe 5 représente l'isotherme d'adsorption d'eau de la montmorillonite calcique en absence de diol).*

sont toujours supérieures ou égales à celles observées sur les systèmes non traités placés dans les mêmes conditions d'équilibre.

On a déjà signalé que les isothermes d'adsorption de l'argile calcique prétraitée avec l'éthane 1,2 diol étaient caractéristiques de ceux observés avec ses homologues supérieurs (propane 1,2 diol, propane 1,3 diol, butane 1,4 diol, butane 1,3 diol et butane 2,3 diol). Toutefois la divergence entre les systèmes non traités et prétraités apparaît pour des fractions molaires en eau de la solution d'équilibre d'autant plus petites que le poids moléculaire du diol est plus élevé. Par exemple, si l'on se rappelle qu'avec les diols primaires (éthane 1,2 diol, propane 1,3 diol et butane 1,4 diol), les quantités d'eau retenues par les systèmes non traités, pour une même fraction molaire de la solution d'équilibre, augmentent de l'éthane 1,2 diol au butane 1,4 diol, il s'ensuit que l'affinité des systèmes prétraités pour l'eau sera (fig. 29) :

$$Q_{H_2O}^{ED} < Q_{H_2O}^{P_{13}D} < Q_{H_2O}^{B_{14}D}.$$

Avec les premiers termes de la série des polyéthylènegylcols, on observe une évolution un peu différente. Par exemple, avec le diéthylèneglycol (fig. 30), les quantités d'eau et de diol adsorbées sur les systèmes prétraités et non traités sont égales tant que la fraction molaire en eau de la solution d'équilibre est inférieure à 0,6. Au-delà de cette valeur, les quantités de diéthylèneglycol trouvées sur les systèmes prétraités sont supérieures à celles trouvées sur les systèmes non traités, alors que les quantités d'eau peuvent être inférieures pour $x_s \in [0{,}6 ; 0{,}95]$ ou supérieures pour $x_s \in [0{,}95 ; 1]$. Ce phénomène est d'ailleurs encore plus marqué avec le triéthylèneglycol.

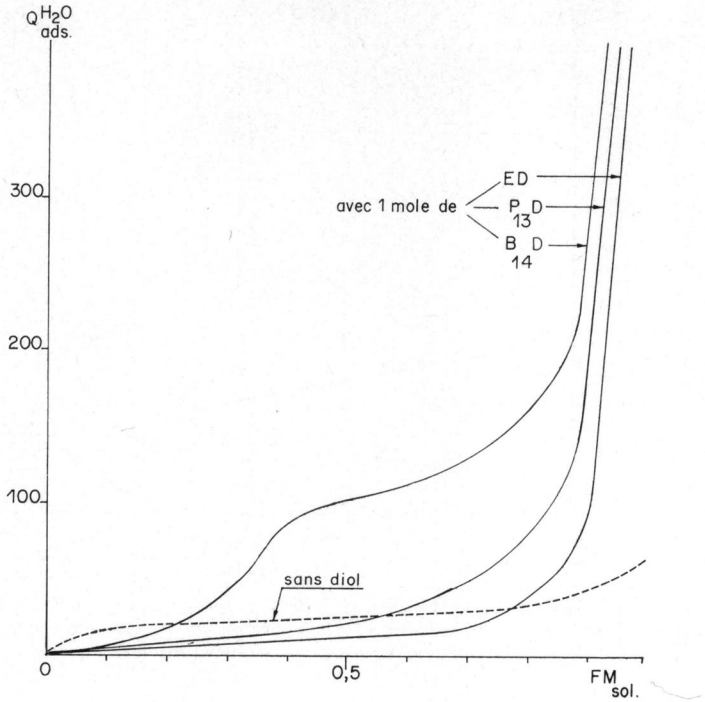


FIG. 29. — *Quantités d'eau retenues par les systèmes prétraités contenant une mole de diol à l'équilibre.*

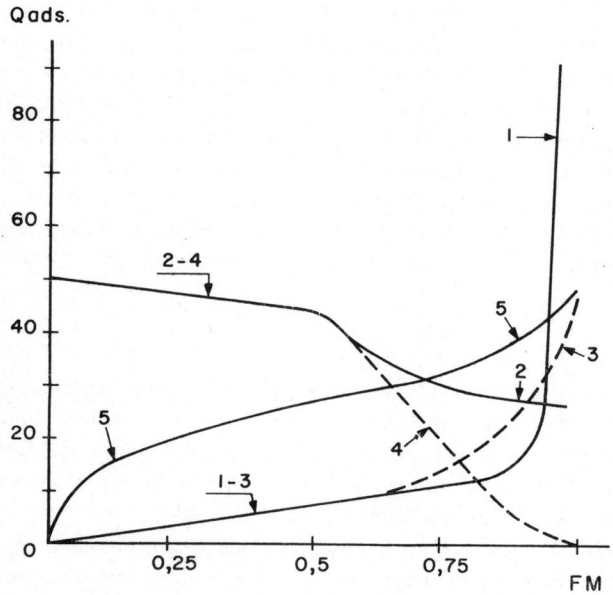


FIG. 30. — *Quantités d'eau (courbe 1) et de diéthylèneglycol (courbe 2) retenues par les systèmes prétraités (les courbes 3, 4 et 5 ont la même signification que sur la fig. 28).*

Pour comprendre le comportement des systèmes prétraités, il est donc nécessaire de ne s'intéresser uniquement qu'aux domaines pour lesquels apparaît une divergence avec les systèmes non traités. Avant d'en donner une interprétation à partir des propriétés de sélectivité, il est important de présenter les résultats obtenus par diffraction des rayons X.

En effet, lorsque la fraction molaire en eau de la solution d'équilibre tend vers 1, c'est-à-dire quand les systèmes prétraités présentent leur comportement particulier, on observe que les distances interréticulaires observées sur l'argile prétraitée sont différentes de celles observées sur l'argile non traitée. En particulier, avec l'éthane 1,2 diol (fig. 31), la distance interréticulaire de l'argile prétraitée passe brutalement de 17,1 à 19,3-19,4 Å, pour redécroître à 19 Å quand la fraction molaire en diol de la solution d'équilibre passe de 0,1 à 0. Inversement, avec l'argile non traitée, on passe d'une façon régulière de 17,1 à 19 Å.

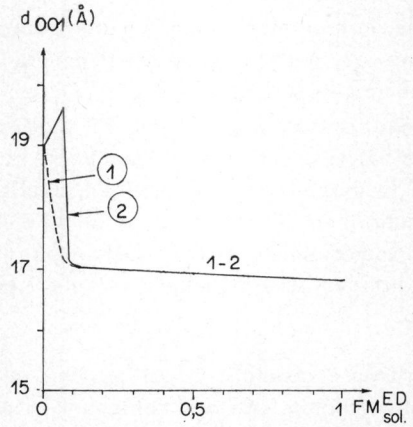


FIG. 31. — *Distances interréticulaires* 001 *des systèmes non traités (courbe* 1*) et prétraités (courbe* 2*) en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-éthane* 1, 2 *diol.*

Dans un travail consacré à l'étude de la distance interréticulaire de la montmorillonite calcique immergée dans des solutions eau-éthane 1,2 diol, Brindley *et al.* (1969) observent les mêmes variations que sur les systèmes prétraités. Il s'ensuit que l'argile prétraitée, en contact avec la phase vapeur délivrée par des solutions riches en eau, est en équilibre avec une phase liquide adsorbée dont la composition est égale à celle de la solution. Or, le volume interfoliaire étant insuffisant pour insérer les quantités d'eau et d'éthane 1,2 diol fixées, on doit admettre que la phase liquide qui a la composition de la solution d'équilibre est localisée dans le volume poral.

Ces résultats entraînent 2 conséquences importantes :

— Sur les systèmes prétraités, coexistent toujours une phase interfoliaire et une phase interagrégat dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre. Donc, quel que soit le mode d'obtention des équilibres, le volume poral de l'argile ne possède aucune propriété de sélectivité.

— Pour une solution donnée, les caractéristiques interfoliaires sont différentes selon que l'argile est en équilibre avec la phase liquide (systèmes prétraités) ou la phase vapeur (systèmes non traités). Ce résultat est d'ailleurs bien connu dans le cas de l'eau où les caractéristiques de l'espace interfoliaire sont différentes selon que l'argile est en équilibre avec la phase liquide ou la pression de vapeur saturante.

Maintenant que l'on sait que le comportement particulier des systémes prétraités correspond à un équilibre du type phase solide — phase liquide, il est possible de proposer un schéma d'hydratation de tels systèmes en utilisant les propriétés de sélectivité de l'argile mises en évidence dans le paragraphe précédent.

4.11. *Schéma de l'hydratation des systèmes prétraités quand la fraction molaire en eau des solutions d'équilibre tend vers* 1.

Plaçons, par exemple, la montmorillonite calcique contenant 25 p. 100 d'éthane 1,2 diol dans une enceinte où la phase vapeur est en équilibre avec une solution dont la fraction molaire en eau est de 0,95.

Avant la fixation d'eau, on sait que l'éthane 1,2 diol est localisé dans l'espace interfoliaire (cf. Chapitre 53) et que l'argile est anhydre. Par ailleurs, on a montré que l'état d'équilibre de la montmorillonite calcique, exposée à une vapeur mixte délivrée par la même solution, est défini par une quantité d'éthane 1,2 diol d'environ 5 p. 100 et une solvatation interfoliaire assurée surtout par l'eau. Enfin, sur la montmorillonite, l'éthane 1,2 diol peut être facilement remplacé par l'eau (Dowdy, 1966 ; Dowdy et Mortland, 1968).

Connaissant ces différents résultats, il est possible d'envisager le processus d'hydratation de la montmorillonite calcique contenant 25 p. 100 d'éthane 1,2 diol en équilibre avec la phase vapeur délivrée par une solution eau-éthane 1,2 diol dont la fraction molaire en eau est de 0,95, de la façon suivante :

— remplacement de l'éthane 1,2 diol par l'eau pour tendre vers une solvation de l'espace interfoliaire de l'argile par l'eau ;

— migration de l'éthane 1,2 diol vers la solution d'équilibre. Toutefois, comme la pression de vapeur du diol est beaucoup plus faible que celle de l'eau et que l'argile entrave sa diffusion vers la solution d'équilibre, l'éthane 1,2 diol pourra s'hydrater dans l'espace interagrégat pour y former une solution dont la composition sera voisine de celle de la solution d'équilibre.

D'une façon plus générale, il est possible d'expliquer les états d'équilibre des systèmes prétraités, en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-diol riches en eau, de la façon suivante :

1) remplacement partiel ou total, par l'eau, du diol interfoliaire apporté par le prétraitement selon la fraction molaire de la solution d'équilibre et les propriétés de sélectivité des surfaces de l'argile ;

2) migration du diol de l'espace interfoliaire vers l'espace interagrégat ou la solution d'équilibre ;

3) solvatation du diol interagrégat et formation d'une solution dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre ;

4) obtention d'un équilibre phase solide - phase liquide interagrégat - phase vapeur.

Il est bien entendu que ces différentes étapes n'apparaissent pas successivement mais qu'elles vont se produire simultanément et interréagir les unes sur les autres. Ce schéma simple permet d'ailleurs d'expliquer plusieurs faits d'expérience :

— Le remplacement du diol interfoliaire par l'eau et la divergence entre les systèmes non traités et prétraités apparaîtront pour des fractions molaires en eau d'autant plus petites que la sélectivité de l'argile pour le diol sera faible.

— Pour une même quantité de produit organique trouvée à l'équilibre, la quantité de diol interagrégat sera d'autant plus élevée que l'affinité de l'argile pour l'eau sera grande. Il s'ensuit que les quantités d'eau trouvées, à une fraction molaire donnée, augmenteront quand on passera de l'éthane 1,2 diol au butane 1,4 diol (cf. 29).

— Les quantités d'eau retenues par les systèmes prétraités doivent être supérieures à celles retenues par les systèmes non traités, car la migration du diol de l'espace interfoliaire vers l'espace interagrégat entraîne une fixation d'eau supplémentaire. Si ce comportement est vérifié pour l'éthane 1,2 diol et tous ses homologues supérieurs, il n'en est pas de même avec les premiers termes de la série des polyéthylèneglycols. On montrera plus tard que cette observation n'est pas en contradiction avec le schéma proposé, mais qu'elle correspond à la réalisation partielle des 2 premières étapes par suite d'un remplacement de plus en plus difficile du composé organique par l'eau.

En plus des conséquences conformes à l'expérience, on va montrer que les différentes étapes proposées pour expliquer le processus d'hydratation des systèmes prétraités, sont vérifiables expérimentalement.

4.12. *Vérification expérimentale du processus d'hydratation des systèmes prétraités quand la fraction molaire en eau de la solution d'équilibre tend vers* 1.

4.121. *Variations des spectres infrarouges pendant l'hydratation.*

Pour comprendre le comportement particulier des systèmes prétraités quand x_s tend vers 1, on a suivi l'évolution des spectres infrarouges de l'eau et du diol pendant le processus d'hydratation. Toutefois l'analyse des spectres nécessite :

— de connaître l'absorption infrarouge du diol interfoliaire et du diol interagrégat,

— d'utiliser un produit organique peu volatil pour éviter toute perte notable pendant l'expérience et avec lequel l'obtention des équilibres est lente.

Pour ces différentes raisons, notre choix s'est porté sur le triéthylène glycol.

4.1211. *Localisation du diol sur l'argile et absorption infrarouge.*

Deux expériences, réalisées dans des conditions différentes, permettent de localiser le diol adsorbé sur l'argile.

— Le film est placé, pendant 12 heures à 80 °C, dans une enceinte contenant du triéthylèneglycol. Après refroidissement et mise à l'air ambiant, l'espacement interréticulaire de 15,5 Å indique que la solvatation de l'espace interfoliaire est assurée par l'eau. Sur cet échantillon, le produit organique est facilement éliminé par une mise sous vide et un chauffage à 120 °C.

— Le film d'argile est placé, pendant 3 semaines à la température ambiante, dans une enceinte contenant du triéthylèneglycol. L'espacement interréticulaire de 17,3 Å indique la présence de produit organique dans l'espace interfoliaire. Sur cet échantillon, seule une fraction du diol est éliminée par une mise sous vide et un chauffage à 120 °C. Après ce traitement, l'espacement interréticulaire est encore de 17,3 Å.

De ces 2 expériences, on déduit que, dans le 1er cas, le diol est surtout localisé dans l'espace interagrégat et que, dans le 2e cas, le diol occupe l'espace interagrégat et l'espace interfoliaire.

Dans le 1er cas, l'absorption infrarouge due aux vibrations de valence des deutéroxyles du diol * est composée essentiellement par une bande située à 2 465 cm^{-1}

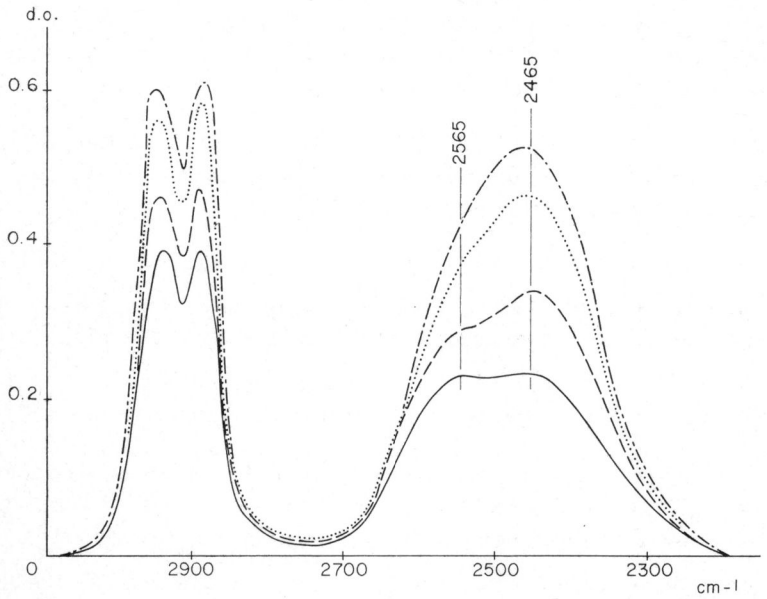


FIG. 32. — *Absorption infrarouge du triéthylène glycol adsorbé sur la montmorillonite calcique*

(*) La deutération du triéthylèneglycol est effectuée en envoyant de très faibles quantités d'eau lourde afin que la fixation d'eau sur l'échantillon soit négligeable.

(fig. 32). On remarque que cette bande d'absorption diminue par une mise sous vide et un chauffage à 120 °C de l'échantillon, et qu'une bande à 2 565 cm^{-1} est résolue.

Dans le 2e cas, l'absorption infrarouge est composée de 2 bandes situées à 2 465 cm^{-1} et à 2 565 cm^{-1} (fig. 33, spectre n° 1). Là encore, l'élimination du produit organique se traduit par une diminution de l'absorption à 2 465 cm^{-1} alors que la bande située à 2 565 cm^{-1} se maintient.

Connaissant la localisation du diol sur l'argile, on en déduit que le diol interfoliaire est caractérisé par l'absorption à 2 565 cm^{-1} et que le diol interagrégat est caractérisé par l'absorption à 2 465 cm^{-1}.

4.1212. *Modifications des spectres infrarouges pendant l'hydratation.*

Le complexe montmorillonite-triéthylèneglycol est exposé, pendant des temps variables, à une pression de vapeur saturante de D_2O. Dans la région de vibration des deutéroxyles, l'absorption infrarouge est due, d'une part à l'eau lourde et, d'autre part au produit organique. Après avoir éliminé l'eau lourde par une mise sous vide et un chauffage à 60 °C, on obtient le spectre infrarouge du triéthylèneglycol correspondant à un état d'hydratation donné. Le spectre infrarouge de l'eau est obtenu en faisant la différence entre les deux spectres. Soulignons que, dans ces conditions expérimentales, on n'observe aucune variation d'intensité de la bande de vibration de valence CH_2. Il n'y a donc pas de pertes en produit organique, qu'il soit interfoliaire ou interagrégat.

Les figures 33 et 34 représentent l'évolution des spectres infrarouges du triéthylènelgycol et de l'eau pendant l'hydratation. Au début de l'expérience, le spectre infra-

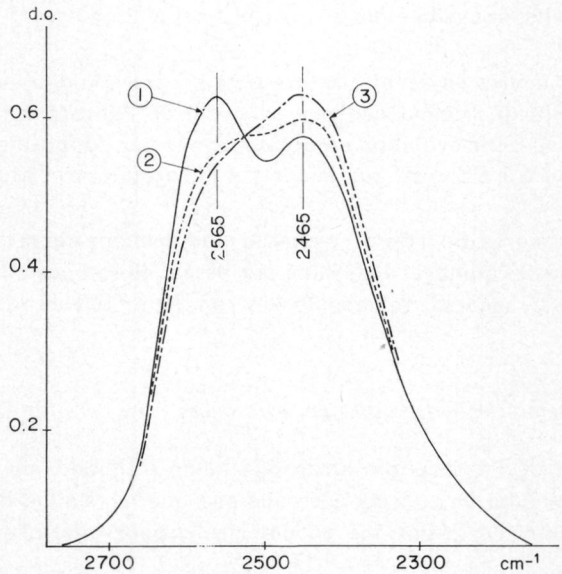


FIG. 33. — *Variation de l'absorption infrarouge du triéthylèneglycol pendant l'hydratation des systèmes prétraités : courbe 1 (spectre initial), courbe 2 (après 36 heures), courbe 3 (après 72 heures).*

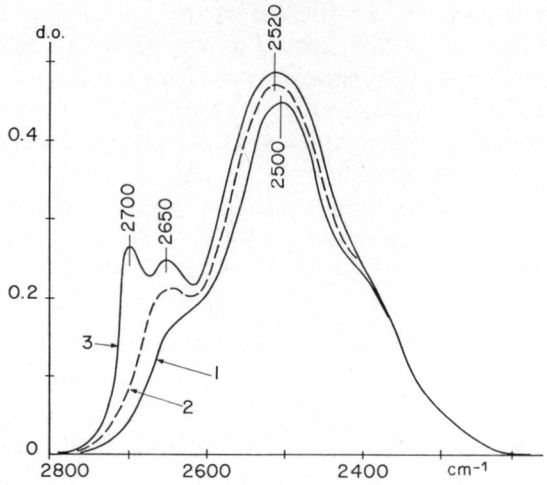


FIG. 34. — *Spectres différentiels de l'eau adsorbée sur la montmorillonite calcique contenant du triéthylèneglycol préalablement adsorbé : spectre* 1 ($t = 0$), *spectre* 2 ($t = 36$ *heures*), *spectre* 3 ($t = 72$ *heures*).

rouge de l'eau est caractérisé par une absorption basse fréquence située vers 2 500 cm^{-1} (fig. 34, spectre n° 1) alors que celui du triéthylèneglycol se compose de 2 bandes situées à 2 565 et 2 465 cm^{-1} (fig. 33, spectre n° 1).

Au bout de 36 heures de contact entre l'échantillon et la phase vapeur, on note que l'absorption infrarouge haute fréquence du triéthylèneglycol diminue au profit de l'absorption basse fréquence (fig. 33, spectre n° 2). Parallèlement, on observe un élargissement de l'absorption basse fréquence de l'eau avec un maximum à 2 520 cm^{-1} et l'apparition d'une nouvelle bande d'absorption à 2 560 cm^{-1} (fig. 34, spectre n° 2).

Au bout de 72 heures de contact, on constate encore une diminution de l'absorption haute fréquence du triéthylèneglycol au profit de l'absorption basse fréquence (fig. 33, spectre n° 3). Cette évolution est accompagnée par l'apparition d'une nouvelle bande d'absorption à 2 670 cm^{-1} sur le spectre infrarouge de l'eau (fig. 34, spectre n° 3).

Au-delà de 72 heures, on n'observe plus de modifications importantes des spectres infrarouges bien que l'équilibre, déterminé par pesée, ne soit pas atteint (l'adsorption d'eau, au bout de 72 heures, représente environ 90 p. 100 de la quantité fixée à l'équilibre).

4.1213. *Interprétation des spectres infrarouges.*

La diminution de l'absorption infrarouge haute fréquence du triéthylèneglycol au profit de l'absorption basse fréquence, indique que la fixation d'eau par les systèmes prétraités entraîne le passage du diol de l'espace interfoliaire vers l'espace interagrégat.

Parallèlement à cette variation du spectre infrarouge du produit organique, on observe l'apparition de bandes d'absorption haute fréquence et l'élargissement de la

bande d'absorption basse fréquence de l'eau adsorbée. En retenant l'interprétation des spectres infrarouges de l'eau adsorbée (Prost, 1975), ces modifications sont dues à la fixation d'une eau interfoliaire soit près des cations (2 620 cm^{-1}), soit éloignée des cations (2 670 cm^{-1}).

La variation des spectres infrarouges pendant l'hydratation des systèmes prétraités confirme donc qu'il y a, d'une part, remplacement partiel du diol interfoliaire par l'eau et, d'autre part, migration du produit organique vers l'espace interagrégat. Il est cependant évident que ces 2 étapes sont indissociables car la migration du diol vers l'espace interagrégat ne peut avoir lieu qu'après son remplacement par l'eau, dans l'espace interfoliaire.

4.122. *Détermination de la fraction molaire de la solution interagrégat.*

Dans le cadre de notre schéma, la quantité d'eau retenue dépend de la quantité de diol interagrégat, donc de la quantité de produit organique apportée par le prétraitement. Pour étudier la relation qui existe entre ces deux grandeurs, on a étudié les états d'équilibre, par contact vapeur, de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables d'éthane 1,2 diol (fig. 35).

Dans la région où les quantités de matière organique apportées sont telles que l'on observe le comportement particulier des systèmes prétraités (branches linéaires ascendantes sur la figure 35), on vérifie bien que tout apport supplémentaire d'éthane 1,2 diol se traduit par une fixation équivalente d'eau. De plus, la distance interréti-

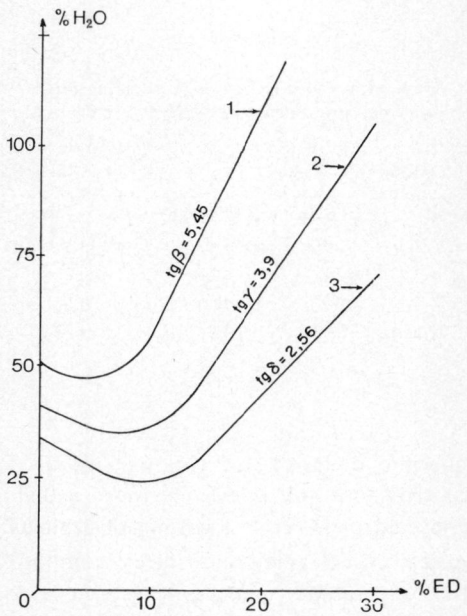


FIG. 35. — *Quantités d'eau retenues par la montmorillonite calcique contenant plus ou moins d'éthane 1,2 diol. Les courbes 1, 2 et 3 ont été obtenues avec des solutions d'équilibre ayant respectivement des fractions molaires en eau de 0,95 ; 0,93 et 0,90.*

culaire ne permettant pas d'insérer dans l'espace interfoliaire les quantités d'eau et diol trouvées à l'équilibre, on est obligé de faire jouer ce rôle de réservoir à l'espace interagrégat.

Dans ces exemples où la fraction molaire en eau des solutions d'équilibre est de 0,95, 0,93 et 0,90, les segments de droite ont des coefficients angulaires de 5,45, 3,9 et 2,56 (fig. 35). Dans ce type de représentation, ceci signifie qu'à 1 gramme de diol supplémentaire correspondent des fixations d'eau de 5,45, 3,9 et 2,56 grammes d'eau, c'est-à-dire à des solutions dont les fractions molaires en eau sont de :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \dfrac{5{,}45/18}{5{,}45/18 + 1/62} = 0{,}949 & x_s = 0{,}95 \\ \dfrac{3{,}9/18}{3{,}9\ /18 + 1/62} = 0{,}931 & x_s = 0{,}93 \\ \dfrac{2{,}56/18}{2{,}56/18 + 1/62} = 0{,}898 & x_s = 0{,}90 \end{array} \right\}.$$

Ainsi, dans la région où les quantités d'éthane 1,2 diol apportées sont telles que l'on observe le comportement de systèmes prétraités, les branches linéaires ascendantes traduisent la fixation d'une solution interagrégat dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre. Ces résultats sont donc en parfait accord avec les distances interréticulaires observées par diffraction des rayons X.

Dans le tableau 12, on a porté la fraction molaire en eau de la phase adsorbée sur les systèmes prétraités pour différents états d'équilibre (cf. fig. 35).

TABLEAU 12

Fractions molaires en eau de la phase absorbée sur les systèmes prétraités pour différents états d'équilibre

Quantité d'éthane 1,2 diol	Quantité d'eau			Fraction molaire adsorbée		
	$x_s = 0{,}95$	$x_s = 0{,}93$	$x_s = 0{,}90$	$x_s = 0{,}95$	$x_s = 0{,}93$	$x_s = 0{,}90$
15	83,5	49,5	31,5	0,95	0,919	0,878 5
20	110,5	68	44,5	0,95	0,92	0,885
25	138	86,5	57	0,95	0,922 5	0,887
30	—	105	70	—	0,924	0,890

Ainsi, quand la quantité d'éthane 1,2 diol trouvée à l'équilibre augmente, la fraction molaire en eau croît tant que x_s est inférieure à 0,95. Pour cette valeur, la fraction molaire de la phase adsorbée reste constante et égale à 0,95.

Comme dans cette région, l'augmentation de la quantité d'éthane 1,2 diol correspond à la formation d'une solution interagrégat dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre, il en résulte que la fraction molaire en eau de la phase interfoliaire (x_i) est, soit égale ($x_i = x_e$ pour $x_s = 0{,}95$), soit plus petite ($x_i < x_e$ pour $x_s < 0{,}95$) que celle de la solution interagrégat (x_e).

On en déduit donc que la phase interfoliaire présente rapidement des caractéristiques différentes de celles de la phase interagrégat, même en présence d'un équilibre du type phase solide-phase liquide. Cette propriété est d'ailleurs observée quand l'argile est en suspension dans l'eau.

4.13. *Interprétation de l'hydratation de la montmorillonite calcique contenant* 25 *p.* 100 *de diol de faible poids moléculaire.*

Plaçons la montmorillonite calcique contenant 25 p. 100 de diol de faible poids moléculaire, en contact avec une phase vapeur délivrée par une solution eau-diol dont la fraction molaire est x_s, et appelons Q_s la quantité de diol fixée par les systèmes non traités dans les mêmes conditions d'obtention de l'équilibre. Deux situations peuvent apparaître :

1° $Q_s > 25$ p. 100 : Expérimentalement on observe une fixation de diol par les systèmes prétraités. Ici, systèmes prétraités et systèmes non traités ont les mêmes états d'équilibre.

2° $Q_s < 25$ p. 100 : Expérimentalement on observe que les états d'équilibre des systèmes prétraités et non traités sont différents. Dans ce cas, le comportement particulier des systèmes prétraités s'explique de la façon suivante :

— remplacement du diol interfoliaire par l'eau,

— migration du diol interfoliaire vers l'espace interagrégat,

— formation d'une solution interagrégat et apparition d'un équilibre du type phase solide-phase liquide-phase vapeur.

Il est évident que ces 3 étapes vont apparaître simultanément sur l'argile et que le raisonnement tenu avec 25 p. 100 est valable pour n'importe quelle quantité de produit organique apportée par le prétraitement. Toutefois, ce modèle ne permet pas d'expliquer le comportement particulier observé avec le diéthylèneglycol ou le triéthylèneglycol pour les fractions molaires où la quantité de diol retenue par les systèmes prétraités est supérieure à celle fixée par les systèmes non traités mais où la quantité d'eau adsorbée est inférieure. Trois hypothèses peuvent être retenues :

— *La cinétique d'adsorption du diol sur les systèmes non traités devient très lente et on n'a pas déterminé un état d'équilibre.* Cette hypothèse est démentie par l'expérience car les quantités adsorbées restent constantes sur des temps très longs.

— *Le contenu interfoliaire est beaucoup plus riche en produit organique lorsqu'on a un équilibre du type phase solide-phase liquide (systèmes prétraités) que quand on a un équilibre du type phase solide-phase vapeur (systèmes non traités).* Cette hypothèse semble néanmoins peu probable, car il est vraisemblable que l'on ne soit pas en présence d'un équilibre phase solide-phase liquide. En effet, le contenu total adsorbé sur les systèmes prétraités diffère peu ou est inférieur à celui des systèmes non traités bien que les distances interréticulaires soient égales. Il s'ensuit que, dans ce cas, la phase interagrégat n'est pas plus importante sur les systèmes prétraités que sur les systèmes non traités.

— *L'adsorption du diéthylèneglycol et du triéthylèneglycol commence à être irréversible* : dans ce cas, l'eau assurera très difficilement le remplacement et la migration du diol interfoliaire vers l'espace interagrégat. Ce phénomène sera d'ailleurs d'autant plus marqué que le poids moléculaire du diol sera plus élevé car l'irréversibilité de l'adsorption augmente avec la taille de la molécule (cf. § 1.2.2). C'est cette hypothèse qui semble la plus raisonnable.

4.2. — *Etude de l'hydratation de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables de polyéthylèneglycol* 20 000

On vient de montrer que le prétraitement de la montmorillonite par des diols de faible poids moléculaire induisait une importante rétention d'eau quand la fraction molaire en eau de la solution d'équilibre tend vers 1. Le comportement particulier des systèmes prétraités a été attribué à la réversibilité de l'adsorption entre l'eau et le produit organique.

Il était donc intéressant d'étudier l'hydratation de la montmorillonite contenant des quantités variables de polyéthylèneglycol 20 000 adsorbé de façon irréversible sur l'argile. Toutefois, il est nécessaire de préciser les modalités de l'adsorption de cette molécule avant de rapporter l'hydratation de ces complexes.

4.21. *Isothermes d'adsorption du polyéthylèneglycol* 20 000 *par la montmorillonite calcique.*

La figure 36 représente l'isotherme d'adsorption en suspension du polyéthylèneglycol 20 000 (PEG 20 000) par la montmorollonite calcique. En abscisses, on a porté, soit la concentration de la solution à l'équilibre (milligramme/millilitre), soit la quantité

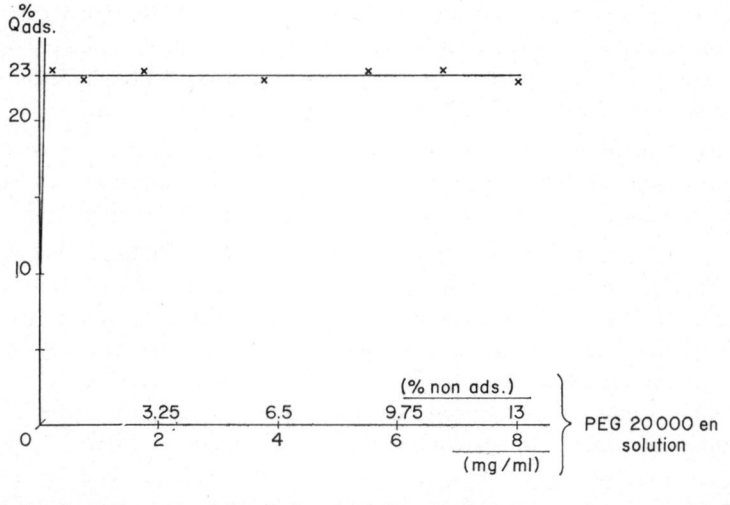


FIG. 36. — *Isotherme d'adsorption, à 20 °C, du polyéthylèneglycol* 20 000 *par la montmorillonite calcique.*

de PEG restant en solution, exprimée en pour cent du poids d'argile (milligramme PEG/100 milligramme d'argile déshydratée à 250 °C). En ordonnées, on a porté la quantité de PEG adsorbée (milligramme PEG/100 milligrammes d'argile déshydratée à 250 °C).

Avec ce produit, on ne retrouve pas de matière organique en solution tant que les quantités apportées, exprimées en milligramme pour 100 milligrammes d'argile, sont inférieures à 23 p. 100. Il y a donc adsorption totale du PEG 20 000 tant que le recouvrement maximum des surfaces n'a pas été atteint. Parallèlement, on observe que la distance interréticulaire varie pour atteindre une valeur de 15,5 Å caractéristique du complexe anhydre montmorillonite-PEG 20 000. Cette valeur de 15,5 Å est d'ailleurs identique pour tous les complexes contenant plus de 18 p. 100 de PEG 20 000.

Les échantillons étant obtenus par évaporation lente de l'eau, il sera donc possible d'étudier l'hydratation de 2 types de complexes :

— les uns pour lesquels la quantité de PEG apportée est inférieure à 23 p. 100. Dans ce cas, le PEG sera essentiellement localisé près des surfaces car l'adsorption est totale ;

— les autres pour lesquels la quantité de PEG apportée est supérieure à 23 p. 100. Pour ces systèmes, le PEG sera localisé, d'une part au niveau des surfaces et, d'autre part dans l'espace interagrégat.

4.22. *Résultats expérimentaux.*

4.221. *Quantités d'eau adsorbées par les complexes montmorillonite-polyéthylèneglycol* 20 000.

La figure 37 représente les quantités d'eau fixées (ordonnées) à différentes humidités relatives (HR) par l'argile calcique contenant des quantités variables de polyéthylèneglycol 20 000 (abscisses).

Pour décrire ces résultats, 2 domaines peuvent être distingués :

— *Domaine* 1 *défini pour des quantités de PEG inférieures à* 13 *p.* 100. Dans toute cette région, les quantités d'eau fixées à une humidité relative donnée décroissent linéairement quand la quantité de matière organique apportée augmente. Il peut être remarqué que ces segments de droite sont parallèles pour des humidités relatives comprises entre 40 et 70 p. 100. De part et d'autre de ces valeurs limites, la valeur absolue des coefficients angulaires diminue.

— *Domaine* 2 *défini pour des quantités de PEG supérieures à* 18 *p.* 100. Dans toute cette région, les quantités d'eau fixées à une humidité relative donnée augmentent linéairement quand la quantité de matière organique apportée croît. Tant que l'humidité relative est inférieure à 80 p. 100, ces segments de droites sont parallèles et caractérisés par une faible pente. Au-delà de cette valeur, le coefficient angulaire augmente avec l'humidité relative à laquelle le complexe est exposé.

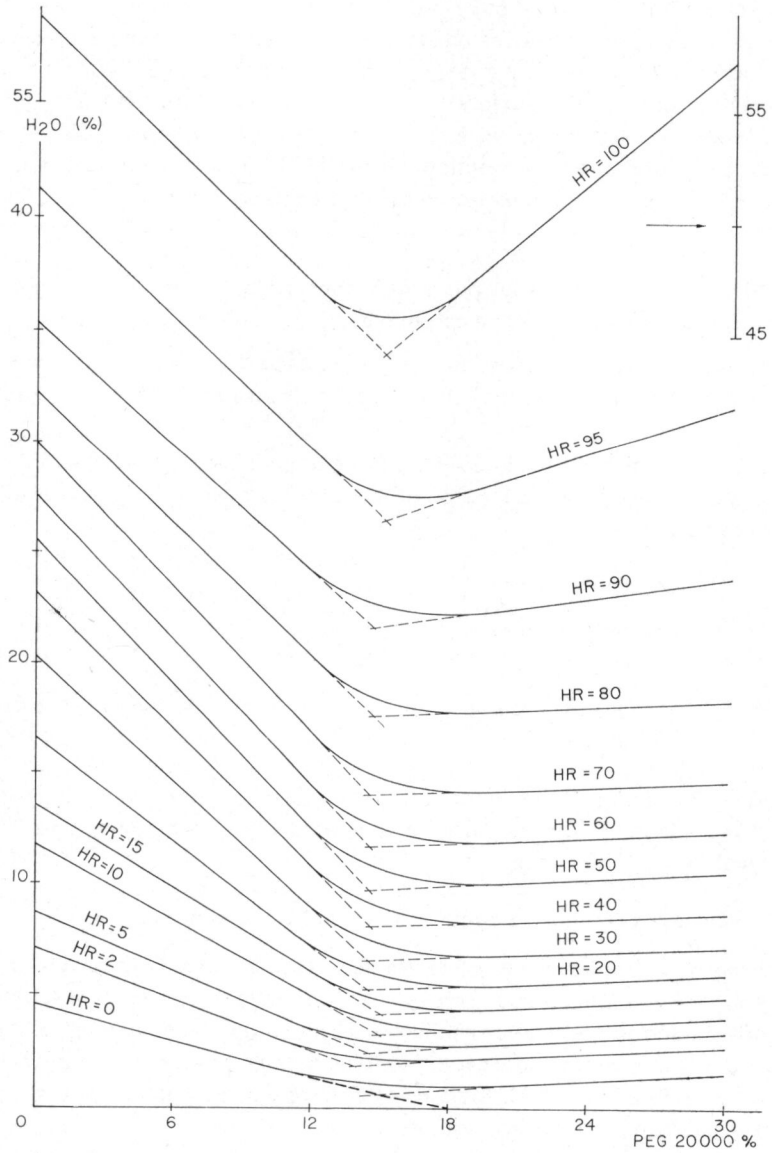


FIG. 37. — *Quantités d'eau fixées par les complexes montmorillonite calcique-polyéthylèneglycol* **20 000.**

4.222. *Caractérisation des systèmes par diffraction des rayons X.*

Là encore, 2 comportements particuliers sont observables quand la quantité de polyéthylèneglycol 20 000 apportée est supérieure à 18 p. 100 ou inférieure à 15 p. 100. Ainsi, quand la teneur en matière organique de l'argile est supérieure à 18 p. 100, la distance interréticulaire, à une humidité relative donnée, est égale sur tous les complexes. Dans ce cas, et tant que l'humidité relative est inférieure à 80 p. 100, la distance interréticulaire varie peu et reste très voisine de celle fixée par le polyéthylèneglycol. Au-delà de 80 p. 100, on observe une hydratation de l'espace interfoliaire et passage de la distance interréticulaire à 19 Å (fig. 38, courbe 2).

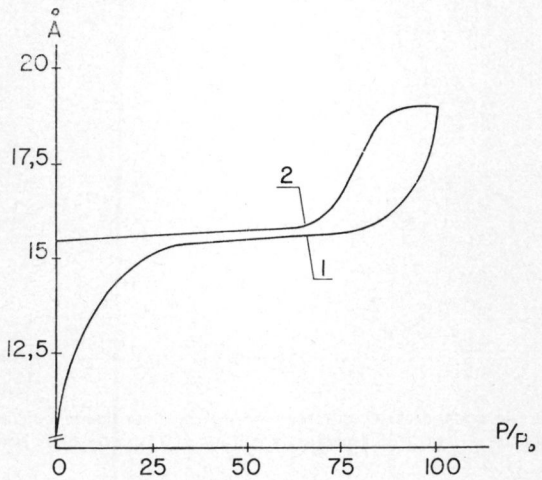


FIG. 38. — *Distances interréticulaires* 001 *de la montmorillonite calcique en présence* (*courbe* 2) *ou en absence* (*courbe* 1) *de polyéthylèneglycol* 20 000.

Avec les complexes contenant de moins en moins de polyéthylèneglycol, une 2e variation de la distance interréticulaire apparaît de plus en plus nettement aux faibles humidités relatives. A l'extrême, avec l'argile calcique, la distance interréticulaire varie très rapidement aux faibles humidités relatives avec existence d'une interstratification. Pour des humidités relatives comprises entre 50 et 80 p. 100, la distance interréticulaire augmente légèrement de 15,5 à 15,8 Å, les diagrammes de diffraction restant cependant rationnels sur les 6 ordres observés. Pour des humidités relatives supérieures à 80 p. 100, on note à nouveau, un phénomène d'ouverture avec apparition d'interstratifiés et passage à 19 Å (fig. 38, courbe 1).

Pour la clarté de la figure, on n'a présenté que ces 2 comportements qui constituent, bien entendu, les limites extrêmes entre lesquelles vont varier les distances interréticulaires de tous les complexes étudiés.

4.223. *Caractérisation des complexes par spectroscopie infrarouge.*

La figure 39 représente les spectres de vibration de valence de D_2O adsorbée sur la montmorillonite calcique contenant des quantités variables de polyéthylèneglycol 20 000. Dans ce cas particulier, les spectres de l'eau s'obtiennent directement car le PEG 20 000 ne présente pas d'absorption notable dans cette région, même aux plus

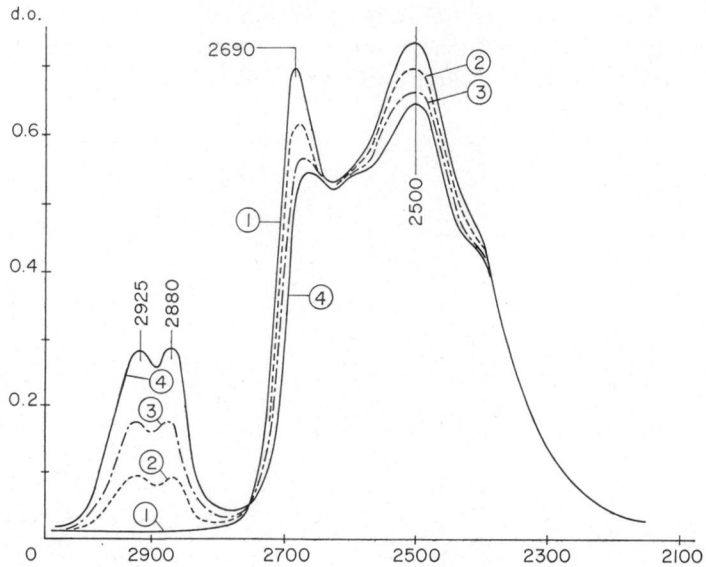


FIG. 39. — *Spectres de vibration de D_2O adsorbée sur la montmorillonite calcique contenant* 0 *p.* 100 (*spectre* 1), 2 *p.* 100 (*spectre* 2), 4 *p.* 100 (*spectre* 3) *et* 10 *p.* 100 (*spectre* 4) *de polyéthylèneglycol* 20 000.

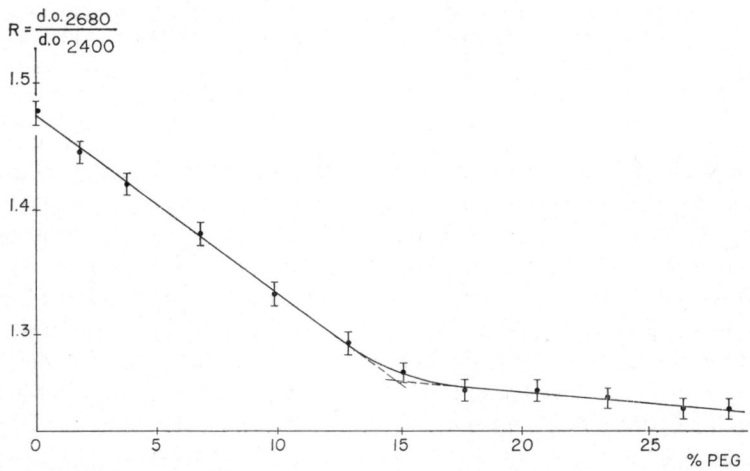


FIG. 40. — *Rapport entre la densité optique à* 2 680 cm^{-1} *et* 2 400 cm^{-1} *de l'eau adsorbée sur différents complexes montmorillonite calcique-polyéthylèneglycol* 20 000.

fortes teneurs des complexes en produit organique. Ceci est dû au très petit nombre de groupements OD par molécule (2 OD pour environ 500 motifs CH_2—O—CH_2).

Tous les spectres ayant été obtenus à une humidité relative de 40 p. 100, la présence de PEG 20 000 entraîne une diminution de l'absorption infrarouge vers 2 680 cm^{-1} et vers 2 520-2 540 cm^{-1}. Pour rendre cette observation quantitative, on a calculé le rapport des densités optiques à 2 680 cm^{-1} et à 2 400 cm^{-1}, car on observe expérimentalement qu'il reste constant sur un domaine d'humidités relatives compris entre 50 et 5 p. 100. Sur la figure 40, on a reporté la valeur constante de ce rapport R pour différents complexes. On remarque que la variation de R est analogue à celle observée pour les isothermes d'adsorption d'eau et que les 2 branches linéaires se coupent pour une teneur en PEG 20 000 légèrement inférieure à 15 p. 100.

4.23. *Discussion et interprétation.*

4.231. *Signification des 2 domaines d'adsorption d'eau.*

Rappelons que l'on a défini 2 domaines pour décrire la fixation d'eau de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables de PEG 20 000.

Dans le 1er, c'est-à-dire quand l'argile contient moins de 13 p. 100 de PEG 20 000, on sait que le produit organique est localisé dans l'espace interfoliaire de l'argile (Rayons X, isotherme d'adsorption) (Parfitt et Greenland, 1970). Par ailleurs, la spectroscopie infrarouge montre que la présence de PEG interfoliaire se manifeste par une diminution de l'absorption à 2 680 cm^{-1} et 2 520-2 540 cm^{-1} (fig. 39) ; c'est-à-dire par une disparition d'eau interfoliaire de symétrie C_s (Prost, 1975).

Dans le 1er domaine, la diminution des quantités d'eau fixées, à une humidité relative donnée, correspond à un remplacement de plus en plus grand, de l'eau interfoliaire par le PEG 20 000.

Dans le 2e cas, c'est-à-dire quand l'argile contient plus de 18 p. 100 de PEG 20 000, la diffraction des rayons X montre que tous les complexes ont la même distance interréticulaire. De plus, pour les plus fortes teneurs des complexes en produit organique, l'isotherme d'adsorption du PEG 20 000 par l'argile montre qu'une fraction de la matière organique apportée est localisée dans l'espace interagrégat. Enfin, la faible diminution du rapport des densités optiques à 2 680 et à 2 400 cm^{-1} est due à une légère augmentation de l'absorption basse fréquence, c'est-à-dire à de l'eau interagrégat ayant contractée 2 liaisons hydrogène (Prost, 1975).

Dans le 2e domaine, l'augmentation des quantités d'eau fixées, à une humidité relative donnée, correspond à une rétention d'eau interagrégat par le produit organique non adsorbé.

4.232. *Interprétation du point d'intersection des 2 segments de droite.*

Les différentes déterminations réalisées sur les complexes montmorillonite-PEG 20 000 montrent que les 2 segments de droite se coupent pour une teneur en produit organique de 14,7 p. 100. Or on sait que ces segments de droite correspondent, soit à une compétition interfoliaire entre l'eau et la macromolécule (domaine 1), soit à une rétention d'eau interagrégat par le PEG non adsorbé (domaine 2).

Comme on peut confondre, en 1re approximation, quantité apportée et quantité fixée tant que les échantillons contiennent moins de 23 p. 100 de PEG (cf. § 4.2.1), ceci signifie que la fixation d'eau due à des macromolécules non adsorbées commence avant que la rétention du PEG par l'argile ne soit terminée. Ceci revient donc à admettre que la quantité maximum de PEG 20 000, réellement en contact avec la surface, est de 14,7 p. 100, bien que la quantité maximale retenue soit de 23 p. 100 (isotherme d'adsorption).

Pour lever la contradiction entre ces différents résultats, imaginons le processus d'adsorption de la macromolécule de la façon suivante :

— Pour les faibles quantités de polyéthylèneglycol, la macromolécule pourra occuper n'importe quel site et la distribution de ses segments au niveau de la surface se fera au hasard. L'occupation de ces sites par la macromolécule entraînera une diminution des quantités d'eau directement proportionnelle au nombre de molécules apportées.

— Au fur et à mesure que le taux de recouvrement de la surface augmente, la distribution des sites vacants sera fonction de celle des sites occupés. Comme la distance interréticulaire n'augmente pas brutalement quand les dernières molécules s'adsorbent, la probabilité pour que tous les segments puissent s'adsorber tend vers 0 puisque le nombre de degrés de liberté diminue. Ainsi le taux d'adsorption moléculaire (nombre de segments adsorbés/nombre de segments adsorbables) sera inférieur à 1 et fonction du taux de recouvrement. Les dernières macromolécules adsorbées présenteront donc des séquences non adsorbées de plus en plus importantes qui se comporteront comme le polyéthylèneglycol interagrégat. Expérimentalement, toute la molécule sera prise en compte quand on établira l'isotherme d'adsorption alors qu'elle se comportera, vis-à-vis de la fixation d'eau, comme si elle était libre car les séquences non adsorbées sont importantes.

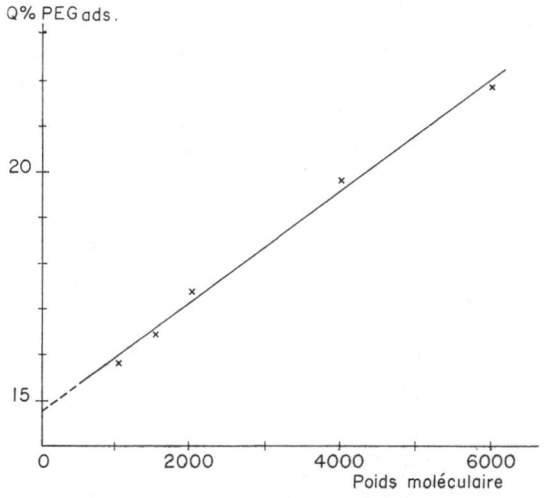


FIG. 41. — *Quantités maximales de polyéthylèneglycol fixées par la montmorillonite calcique à 20 °C.*

Pour tester ce schéma, on a mesuré la quantité maximale de PEG fixée par la montmorillonite calcique quand le poids moléculaire varie. En effet, lorsque la taille de la macromolécule diminue, l'occupation des sites vacants se fera d'autant plus facilement que le nombre de segments constitutifs est plus petit. Expérimentalement, on observe que les quantités fixées diminuent pour atteindre 14,7 p. 100 à poids moléculaire nul (fig. 41).

4.233. *Valeurs du minimum d'adsorption.*

D'après ce qui précède, le point d'intersection des 2 segments de droite correspond à une teneur en matière organique où la solvatation de l'espace interfoliaire est assurée par le PEG 20 000 et où la rétention d'eau interagrégat par la macromolécule non adsorbée est nulle. Tant que la solvatation de l'espace interfoliaire est assurée par le PEG (humidités relatives inférieures à 70 p. 100), la valeur du minimum d'adsorption, obtenue au point d'intersection des 2 segments de droite, représente la quantité d'eau adsorbée en dehors des surfaces, c'est-à-dire l'eau externe.

Dans le tableau 13, on a porté les quantités d'eau externe exprimées, soit pour 100 grammes d'argile (Q_A), soit pour 100 grammes de complexes (Q_c). Il est évident que

$$Q_A = 1{,}147\ Q_c\ .$$

TABLEAU 13

Quantités d'eau externe fixées par les complexes montmorillonite calcique-polyéthylèneglycol 20 000

Humidité relative (en p. 100)	Quantité d'eau externe	
	en p. 100 par g d'argile	en p. 100 par g de complexe
2	2,2	1,92
5	3,1	2,7
9	4	3,45
15	5	4,36
20	5,8	5,05
30	7	6,10
40	8,4	7,32
50	10,2	8,89
60	12,2	10,6
70	14,5	12,64

Par la méthode B.E.T., le volume monomoléculaire (Vm) trouvé est de 0,034 9 cm^3/g de complexe, valeur en très bon accord avec celle donnée par la méthode du « point B » de Brunauer (3,5 cm^3). En prenant un encombrement moléculaire de l'eau de 66 $m^2/mmole$, on trouve une surface de 128 m^2/g de complexe.

Par la méthode du « t-plot », la surface de l'adsorbant est donnée par la relation :

$$S = 10^2 \frac{t}{V}$$

où t : représente l'épaisseur statistique de la couche d'eau adsorbée à une humidité relative donnée (t en Å),

V : volume de liquide adsorbé par gramme d'adsorbant (V en $cm^3/100$ g d'adsorbant).

En utilisant les valeurs de t données par Hagymassy *et al.* (1969), on trouve une surface de 115 m^2/g de complexe.

On remarque immédiatement que l'aire de la surface du complexe argile-PEG 20 000, trouvée par ces 2 méthodes, est très voisine de l'aire des surfaces externes de la montmorillonite calcique (120 m^2/g) déterminée par adsorption d'azote. Ceci signifie donc que l'augmentation de la distance interréticulaire, provoquée par l'adsorption interfoliaire du PEG, n'entraîne pas de variation de l'aire de la surface de l'adsorbant. Ce résultat n'est d'ailleurs pas surprenant car l'aire des surfaces latérales des particules est négligeable devant celle des surfaces de base (Hénin *et al.*, 1969).

Ces différents résultats confirment donc que la fixation d'eau se fait sur les surfaces externes du complexe montmorillonite calcique-PEG 20 000 tant que l'humidité relative est inférieure à 70 p. 100.

Par contre, quand l'humidité relative est supérieure à 70 p. 100, on sait, par diffraction des rayons X, que la solvatation interfoliaire est assurée par l'eau et le PEG. De ce fait, le minimum d'adsorption représente, d'une part, la fixation d'eau externe et, d'autre part, la fixation d'eau interfoliaire ; la nature des résultats obtenus dans ce travail ne permettant pas d'estimer leurs contributions respectives.

4.234. *Interprétation de la pente des segments de droite.*

Pour alléger la discussion, plaçons l'origine des axes des abscisses à $x = 14{,}7$ p. 100. Dans ce cas, les 2 segments de droite auront pour équation :

$$\begin{cases} y_1 = a_1 X + b & (-14{,}7 \text{ p. } 100 < X < 0 \text{ p. } 100) \\ y_2 = a_2 X + b & (X > 0 \text{ p. } 100) \\ X = Q_A - 14{,}7 \text{ p. } 100 \end{cases}$$

où Q_A représente la quantité de PEG 20 000 apportée.

Connaissant la signification de *b* (§ 4.2.3.3), de a_1 (compétition interfoliaire) et de a_2 (hydratation du PEG interagrégat), on ne s'intéressera qu'aux variations du coefficient angulaire en fonction de l'humidité relative.

Domaine 1 :

Ce domaine, défini pour décrire les isothermes d'adsorption, correspond aux systèmes contenant moins de 13 p. 100 de PEG 20 000. Soit N_T le nombre total de sites interfoliaires susceptibles d'être occupés par l'eau ou le PEG 20 000 ; le recouvrement

total des surfaces étant assuré par 14,7 p. 100 de PEG, le nombre de sites disponibles (Nd) pour la fixation d'eau sera :

$$N_d = N_T \left(1 - \frac{q}{14,7}\right)$$

où q représente la quantité de PEG apporté exprimée en p. 100.

Toutefois, le nombre de sites disponibles susceptibles d'être effectivement occupés par l'eau sera fonction de l'humidité relative car les diagrammes de diffraction révèlent la présence d'une interstratification. Le nombre de sites accessibles à l'eau (N_a) sera donc de la forme :

$$N_a = f(HR) \times N_d = f(HR) \times \left(1 - \frac{q}{14,7}\right) \times N_T$$

où f(HR) représente le taux de feuillets ouverts à une humidité relative donnée. f(HR) est donc compris entre 0 et 1.

Si on suppose que l'ouverture des feuillets ne contenant pas de matière organique n'est pas modifiée par la présence des feuillets recouverts par le PEG, f(HR) sera constant, pour une humidité relative donnée, pour tous les complexes appartenant au domaine 1. Il s'ensuit que le coefficient angulaire des segments de droite est directement relié au taux de feuillets ouverts qui ne contiennent pas de PEG 20 000.

Cette interprétation est confirmée par la valeur maximale de a_1 pour des humidités relatives comprises entre 0,4 et 0,7. En effet, dans tout ce domaine, l'existence de diagrammes rationnels sur l'argile calcique indique que tous les feuillets non recouverts de PEG sont ouverts ; donc que f(HR) est maximum et égal à 1.

Domaine 2 :

Dans cette région, définie pour les systèmes contenant plus de 18 p. 100 de PEG, l'espace interfoliaire n'intervient pas et l'augmentation des quantités d'eau fixée correspond à l'hydratation du produit organique non adsorbé. Il en résulte que le coefficients angulaire des segments de droite a_2 représente la quantité d'eau fixée par l'unité de masse de PEG.

4.235. *Conclusion.*

On a résumé, dans le tableau 14, l'origine de la fixation de l'eau par les complexes montmorillonite calcique-polyéthylèneglycol 20 000. On remarque que l'hydratation est la résultante de 2 actions antagonistes :

— l'une de compétition liée au recouvrement des surfaces de l'argile par la matière organique. Elle se situe toujours au niveau de l'espace interfoliaire et est maximum pour les systèmes contenant environ 15 p. 100 de produit organique ;

— l'autre de rétention liée à l'hydratation du PEG non adsorbé. Elle se situe au niveau de l'espace interagrégat. Elle est d'autant plus importante que la quantité de matière organique non adsorbée et l'humidité relative sont grandes.

TABLEAU 14

Origine de la fixation d'eau par les complexes montmorillonite calcique-polyéthylèneglycol 20 000

Humidité relative	Quantité de PEG apportée (Q)	
	Q < 14,7 p. 100	Q > 14,7 p. 100
HR < 40 p. 100	— Eau externe — Hydratation à deux couches des surfaces non recouvertes par le PEG	— Eau externe — Hydratation du PEG inter-agrégat
40 < HR < 70 p. 100	— Eau externe	— Eau externe — Hydratation du PEG inter-agrégat
70 < HR < 100 p. 100	— Eau externe — Hydratation à trois couches des surfaces non recouvertes par le PEG — Hydratation des surfaces recouvertes par le PEG	— Eau externe — Hydratation des surfaces recouvertes par le PEG — Hydratation du PEG inter-agrégat

C'est d'ailleurs cette dernière action de la matière organique que l'on a mis en évidence pour expliquer le comportement particulier des systèmes prétraités avec les diols de faible poids moléculaire (§ 4.1.2.2). L'argile étant cependant capable de former des associations stables avec de tels produits, l'action de compétition, mise en évidence avec le PEG 20 000, doit également exister avec les diols de faible poids moléculaire. C'est pour vérifier s'il existe une analogie de comportement entre l'argile contenant une macromolécule ou un diol de faible poids moléculaire, que l'on a mesuré les quantités d'eau retenues par la montmorillonite calcique contenant des quantités variables d'éthane 1,2 diol.

4.3. — *Hydratation de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables d'éthane* 1,2 *diol*

4.31. *Mode d'obtention des équilibres.*

Avec le polyéthylèneglycol 20 000, l'obtention des isothermes était aisée puisque tout transfert de matière organique est impossible. Par contre, avec l'éthane 1,2 diol, les systèmes contenant peu de produit organique vont en fixer, aux dépens de la solution d'équilibre, pour atteindre les états d'équilibre observés sur les systèmes non traités. Toutefois, l'expérience montre que de tels systèmes fixent rapidement une quantité maximale d'eau et que le contenu adsorbé (masse, composition) ne varie pas significativement pendant 2 à 3 jours (palier n° 1, fig. 42). Après ce pseudo-équilibre, on observe une fixation d'éthane 1,2 diol et une désorption d'eau pour atteindre l'état d'équilibre des systèmes non traités (palier n° 2, fig. 42).

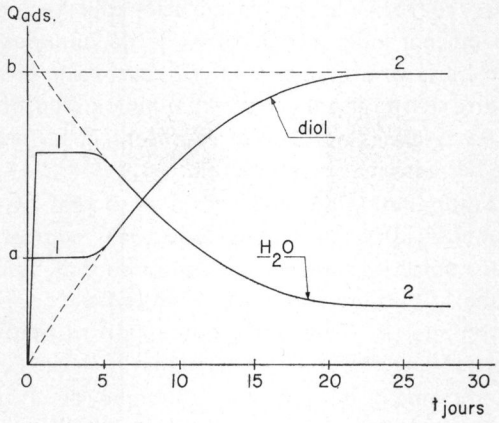


FIG. 42. — *Cinétiques d'adsorption d'eau et d'éthane 1,2 diol par les systèmes prétraités contenant moins de diol que les systèmes non traités, placés dans les mêmes conditions d'équilibre (a et b représentent les quantités d'éthane 1,2 diol apportées par le prétraitement ou fixées par les systèmes non traités).*

Pour obtenir des courbes analogues à celles obtenues avec le polyéthylèneglycol, on a déterminé le contenu adsorbé au niveau du pseudopalier contenant moins d'éthane 1,2 diol que les systèmes non traités placés dans les mêmes conditions.

4.32. *Résultats expérimentaux.*

Sur la figure 35 (cf. § 4.1 2 2), on a reporté les quantités d'eau fixées par l'argile calcique contenant des quantités variables d'éthane 1,2 diol et placées à des humidités relatives de 95 p. 100 (courbe 1), 93 p. 100 (courbe 2) et 90 p. 100 (courbe 3).

On remarque immédiatement le même type de comportement qu'avec le PEG 20 000. Toutefois, 2 différences essentielles apparaissent :

— le minimum d'adsorption d'eau varie avec l'humidité relative,

— le coefficient angulaire des segments de droite ascendants est beaucoup plus grand qu'avec le PEG 20 000.

4.33. *Interprétation.*

On a déjà démontré que les segments de droite ascendants traduisent la formation d'une solution interagrégat dont la composition est égale à la solution d'équilibre (cf. § 4.1.2.2). Il y a donc, pour ces segments de droite ascendants, une parfaite analogie entre les résultats obtenus avec l'éthane 1,2 diol et le PEG puisqu'ils représentent, dans les 2 cas, une fixation d'eau interagrégat due à la matière organique non adsorbée. Pour qu'il y ait une analogie entre ces systèmes et les complexes montmorillonite PEG, il suffit de montrer que la diminution des quantités d'eau retenues, quand la quantité d'éthane 1,2 diol adsorbée augmente, correspond à une compétition interfoliaire.

Sur ces différentes courbes, les points caractérisant les états d'équilibre des systèmes prétraités se placent toujours au voisinage du minimum d'adsorption. Or, sur les systèmes non traités, on a montré qu'il y avait une fixation d'éthane 1,2 diol dans l'espace interfoliaire se traduisant par une diminution d'adsorption d'eau interne. De plus, on sait que les systèmes non traités représentent les états d'équilibre pour lesquels la quantité de diol adsorbée est maximum.

Il en résulte que la diminution des quantités d'eau fixées par la montmorillonite calcique quand les quantités d'éthane 1,2 diol adsorbées augmentent, est due à une compétition interfoliaire entre les molécules d'eau et de diol. Toutefois, la sélectivité de l'argile pour l'éthane 1.2 diol augmentant quand la fraction molaire en eau de la solution d'équilibre diminue, le minimum d'adsorption apparaîtra donc pour des quantités de matière organique de plus en plus grande.

Par ailleurs, l'abaissement du potentiel chimique de 1 gramme d'eau par 1 gramme de matière organique est d'autant plus important que le poids moléculaire est plus petit. Réciproquement, pour une même humidité relative, la quantité d'eau retenue par 1 gramme de matière organique sera d'autant plus grande que le poids moléculaire du composé organique sera petit. Dans ces conditions, les segments de droite qui représentent la fixation d'eau interagrégat par le composé organique non adsorbé, auront, pour une même humidité relative, des coefficients angulaires plus élevés avec les diols de faible poids moléculaire qu'avec le PEG 20 000.

4.4. — *Conclusion*

Ainsi la fixation d'eau par les systèmes prétraités diminue (compétition interfoliaire), passe par une valeur minimale, puis augmente (rétention interagrégat), quand la teneur en matière organique croît. Toutefois, ces actions antagonistes de la matière organique présentent des intensités très variables selon la taille de la molécule apportée et l'humidité relative à laquelle on se place.

Il s'ensuit que les courbes traduisant la quantité d'eau retenue en fonction de la quantité de matière organique apportée, ont des allures très différentes. Afin d'être clair, on séparera les résultats obtenus avec les molécules de faible poids moléculaire de ceux obtenus avec les macromolécules.

4.41. *Action des molécules de faible poids moléculaire.*

Aux faibles humidités relatives, les associations argile-diol sont favorisées et le phénomène de compétition est très prononcé. Inversement, aux fortes humidités relatives, les associations argile-eau sont privilégiées et la matière organique apportée est surtout localisée dans l'espace interagrégat. Dans ce cas, les phénomènes de compétition sont très réduits par rapport aux phénomènes de rétention qui peuvent atteindre des proportions très importantes.

En conclusion, dans les domaines d'humidités élevées correspondant à des conditions normales pour un sol, les molécules organiques de petite taille augmenteront la rétention en eau de l'argile car :

— les interactions argile-eau sont dominantes,
— la matière organique est surtout localisée dans l'espace interagrégat,
— ces molécules sont très actives pour la rétention d'eau.

4.42. *Action des molécules organiques de grande taille.*

Dans ce cas, les phénomènes de compétition présentent toujours la même intensité car l'affinité de l'argile pour les macromolécules est grande et indépendante de l'humidité relative. Il en résulte que la quantité de matière organique qui rend la fixation d'eau minimale reste élevée quelle que soit l'humidité relative à laquelle l'argile est exposée.

La rétention d'eau due à la matière organique interagrégat prend des proportions très modérées même aux humidités relatives les plus élevées car l'affinité de ces macromolécules pour l'eau est assez faible.

En résumé, la présence de macromolécules se traduira toujours par une fixation d'eau plus faible qu'avec les molécules de petite taille car :

— les phénomènes de compétition sont importants et constants,
— l'affinité des macromolécules pour l'eau diminue quand la taille augmente.

On verra, dans le prochain chapitre, que la comparaison entre ces types de molécules permettra de proposer un modèle d'action des matières organiques présentes dans le sol.

Chapitre V. Conséquences de cette étude

L'étude de l'adsorption compétitive de l'eau et des diols sur la montmorillonite entraîne plusieurs conséquences qui peuvent être d'ordre théorique (répartition de l'eau entre les surfaces internes et externes, configuration des polymères adsorbés), méthodologique (mesure de la surface totale avec l'éthane 1,2 diol) ou prospectif (modèle d'action de la matière organique dans les sols).

5.1. — *Répartition de l'eau entre les surfaces internes et externes*

Les études portant sur l'hydratation de la montmorillonite mettent en évidence 2 faits apparemment contradictoires ; à savoir que la fixation d'eau progresse alors que la distance interréticulaire ne varie pratiquement plus. Pour expliquer ces faits, 2 hypothèses ont été émises :

— Hypothèse n° 1 : il y aurait d'abord hydratation des cations et ouverture des feuillets, puis fixation d'eau autour de ces motifs (Mamy, 1968 ; Glaeser, 1953) ;

— Hypothèse n° 2 : Après la phase d'ouverture, le contenu en eau interfoliaire varierait peu et la fixation d'eau se produirait essentiellement sur les surfaces externes (Calvet, 1972 ; Mamy et Gaultier, 1972).

L'observation des isothermes d'adsorption d'eau de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables de PEG 20 000 montre que les quantités d'eau fixées par tous les complexes sont égales quand l'humidité relative varie entre 40 et 70 p. 100. Par ailleurs, c'est pour ce domaine d'humidité que la distance interréticulaire de l'argile calcique varie très peu.

En retenant les interprétations données précédemment, on est amené à considérer, à moins d'admettre un mécanisme de compensation fortuit, que l'eau s'adsorbe sur les surfaces externes.

Ces résultats confirment donc l'hypothèse n° 2.

5.2. — *Configuration des polymères adsorbés*

Pour expliquer les différents résultats observés sur la fixation des polymères (formes des isothermes, influence du poids moléculaire, etc... Silberberg, 1962*a*), de nombreuses études théoriques ont été publiées.

5.21. *Description théorique de l'adsorption*

Pour décrire la configuration d'une macromolécule adsorbée, on introduit 3 types de séquences (cf. § 3.2.2) :

— Séquences adsorbées (« Trains »)
— Séquences en boucle (« Loops »)
— Séquences terminales (« Tails »).

La description de l'état adsorbé consiste à définir la proportion des différentes séquences et le nombre de segments qui les constituent. La démarche utilisée est l'estimation de la probabilité pour passer d'un site à un autre par un chemin intermédiaire comprenant a étapes successives. Après avoir attribué un état probable à chaque configuration, on détermine, en fonction de l'énergie nette d'interaction ε (*) entre un segment et un site d'adsorption, la proportion des différentes séquences qui rend maximum la fonction d'état.

Ces calculs ont été résolus en faisant 2 hypothèses principales :

— Le taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant par le polymère est faible. Dans ce cas, on exclut les interactions latérales qui peuvent apparaître entre les molécules adsorbées et les chevauchements des chaînes sur la surface.

— Les sites occupés, soit par un segment, soit par une molécule de solvant, ont une symétrie cubique (la surface de l'adsorbant est représentée par le plan x, y, 0).

Les 1res études théoriques sur la configuration des polymères linéaires et flexibles à l'état adsorbé (Simha *et al.*, 1953 ; Frisch et Simha, 1954 ; Frisch, 1955), suggèrent

(*) L'énergie nette d'interaction représente le bilan entre la chaleur d'adsorption d'un segment et les changements d'entropie liés à la macromolécule et à la désorption des molécules de solvant.

que le nombre de segments en contact avec la surface (« Anchor segments ») est très faible et que le polymère est surtout localisé dans la phase liquide. Plus tard, Silberberg (1962*a*) montre que ces conclusions sont en contradiction avec les résultats expérimentaux et que le nombre de segments en contact avec la surface doit être plus élevé que ne le laisse prévoir le traitement théorique de Simha *et al.* A partir d'études théoriques, cet auteur (1962*a*, *b*) montre que la proportion de segments adsorbés est grande et que la taille des boucles est faible, ces 2 grandeurs étant indépendantes de la taille du polymère. En réalité et comme l'ont montré d'autres auteurs (Hoeve *et al.*, 1965 ; Di Marzio et Mac Crackin, 1965 ; Roe, 1965 ; Rubin 1965 ; Motomura et Matuura, 1969 ; Clayfield et Lumb, 1974*a*, *b*), ces conclusions, apparemment opposées, tiennent au fait que les domaines d'énergie d'interaction explorés étaient différents ; petites énergies dans le cas de Simha *et al.*, grandes énergies pour Silberberg.

Ces derniers auteurs font intervenir une valeur critique de l'énergie nette d'interaction ε_c pour laquelle apparaissent des discontinuités dans la configuration de la macromolécule adsorbée. Cette valeur critique, voisine de kT, est plus faible que celle qui est normalement associée à la formation de la liaison hydrogène. Selon que l'énergie nette d'interaction sera supérieure, égale ou inférieure à cette valeur critique, l'état adsorbé sera différent.

— Si $\varepsilon > \varepsilon_c$, le nombre de segments constituant les séquences en boucles ou terminales diminue très rapidement lorsque l'énergie d'adsorption augmente et est indépendant de la taille du polymère. Cependant, il est à noter que la longueur des séquences en contact avec la surface est relativement petite, bien que le nombre de segments adsorbés, proportionnel à N, soit important.

— Si $\varepsilon \neq \varepsilon_c$, le nombre de segments adsorbés ou en boucles dépend de $\sqrt{N}$ alors que le nombre de segments dans les séquences terminales est directement proportionnel à N. Pour cette valeur de l'énergie, environ 1/3 des segments participent à l'adsorption et le reste de la molécule entrerait dans les séquences terminales plutôt que dans les séquences en boucles. C'est dans cette interprétation que ces traitements diffèrent de celui de Simha *et al.* (1953).

— Si $\varepsilon < \varepsilon_c$, le nombre de segments adsorbés devient faible et indépendant de N. Les segments restants entrent essentiellement dans les séquences terminales car la probabilité de formation des séquences en boucles reste faible. Le nombre de segments composant ces derniers reste toutefois une fonction de $\sqrt{N}$.

Ainsi, si la connaissance des interactions entre la surface et la macromolécule est essentielle, il ne faut pas oublier les hypothèses émises dans ces différents traitements.

5.22. *Apport expérimental.*

Ces différentes études montrent que la configuration d'un polymère adsorbé est une fonction de l'énergie nette d'interaction entre un segment et l'adsorbant. Ainsi, avec le PEG 20 000, la distance interréticulaire et les isothermes d'adsorption d'eau montrent que cette macromolécule présente essentiellement des séquences

adsorbées tant que le taux de recouvrement de la surface est assez faible (Parfitt et Greenland, 1970).

Par ailleurs, et pour expliquer le minimum d'adsorption d'eau de la montmorillonite calcique contenant du PEG 20 000, on a admis que les dernières macromolécules présentaient des séquences non adsorbées très importantes. Comme la fixation des dernières macromolécules ne s'accompagne pas d'une brusque variation de la distance interréticulaire (absence de chevauchements ou de séquences en boucles), il est vraisemblable que les séquences non adsorbées soient des séquences terminales.

L'apparition de séquences terminales va donc dépendre, d'une part de l'énergie nette d'interaction ($\varepsilon < \varepsilon_c$) et, d'autre part du taux de recouvrement de la surface. Plus généralement, la description de l'état adsorbé des macromolécules devra faire intervenir l'énergie d'interaction et le taux de recouvrement des surfaces.

Enfin, la diminution des quantités maximales de PEG fixées par l'argile quand la taille des molécules décroît, correspond à une occupation de plus en plus facile des derniers sites vacants lorsque le taux d'occupation des surfaces par la macromolécule tend vers 1.

5.3. — *Estimation de la surface totale des minéraux argileux avec l'éthane* 1,2 *diol*

Les mesures de la surface externe par adsorption d'un gaz (N_2, Ar, butane) et de la surface totale avec l'éthane 1,2 diol sont couramment utilisées pour caractériser les minéraux argileux.

Toutefois, pour mesurer la surface totale de l'argile, différents protocoles expérimentaux ont été proposés (Dyal et Hendricks, 1950 ; Bower et Gschwend, 1952 ; Bower et Goertzen, 1959), car la quantité d'éthane 1,2 diol retenue par l'argile dépend de la nature du cation compensateur (Dyal et Hendricks, 1950, 1952 ; Mac Neal, 1964 ; Brindley, 1965 ; Davis *et al.*, 1971). Pour expliquer ces observations, 2 hypothèses ont été émises :

— *L'éthane* 1,2 *diol assure le recouvrement total des surfaces de la montmorillonite dans les conditions expérimentales utilisées mais les distances intermoléculaires varient avec la nature du cation compensateur.* Dans ce cas, on ne doit pas prendre pour la montmorillonite un encombrement moléculaire constant et égal à 3,22 m^2/mg d'éthane 1,2 diol adsorbé.

— *L'éthane* 1,2 *diol n'assure pas le recouvrement total des surfaces de la montmorillonite dans les conditions expérimentales utilisées.* Dans ce cas, l'encombrement moléculaire est constant quel que soit le cation compensateur, mais les quantités adsorbées varient parce que le taux de recouvrement des surfaces est différent.

Pour apporter une réponse en faveur de l'une ou l'autre des hypothèses, il est donc nécessaire de connaître la quantité d'éthane 1,2 diol qui assure le recouvrement total des surfaces. Cette estimation peut se faire à partir :

— des densités électroniques (Bradley *et al.*, 1963 ; Reynolds, 1965 ; Brindley, 1965) des complexes silicates-éthane 1,2 diol. Ces différents travaux conduisent à un contenu interfoliaire compris entre 30 et 35 p. 100 pour les complexes à 2 couches.

— des cinétiques de désorption : récemment Eltantawy et Arnold (1974) ont présenté une étude critique des différents résultats publiés sur cette méthode et proposé un nouveau protocole expérimental. Ces auteurs sont amenés à proposer un encombrement moléculaire indépendant de la nature du cation et égal à 2,22 m^2/mg d'éthane 1,2 diol.

En résumé, ces différents travaux montrent que la quantité d'éthane 1,2 diol nécessaire au recouvrement total des surfaces est supérieure à 250 mg/g d'argile. En particulier, pour Eltantawy et Arnold (1974), cette quantité serait de 360 mg/g d'argile et indépendante de la nature du cation.

D'un autre côté, l'existence de la branche de type P sur le diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique pour l'eau et l'éthane 1,2 diol, permet de séparer le diol interfoliaire du diol interagrégat. Les résultats fournis par cette méthode indiquent :

— que la quantité d'éthane 1,2 diol interfoliaire varie légèrement avec le contenu interagrégat. Il en résulte que toute disparition de diol interagrégat se traduira par une diminution du contenu interfoliaire en produit organique ;

— que tout le diol adsorbé n'est pas localisé dans l'espace interfoliaire. Ainsi pour l'argile calcique les 51,7 p. 100 adsorbés à 20 °C se répartissent en 19,7 p. 100 interagrégat et en 32 p. 100 interfoliaire, valeur en très bon accord avec les résultats donnés par Reynolds.

Ainsi la quantité d'éthane 1,2 diol retenue par l'argile et déterminée à partir des cinétiques de désorption du produit organique, sera la résultante de 2 processus antagonistes :

— l'un qui provoque une surestimation du contenu interfoliaire en comptabilisant de l'éthane 1,2 diol interagrégat,

— l'autre qui entraîne une sous-estimation du contenu interfoliaire par suite d'une désorption d'éthane 1,2 diol interne quand on élimine le produit organique en excès, localisé dans l'espace interagrégat.

Le même type de calcul réalisé à partir des branches de type P observées sur les diagrammes de sélectivité des argiles Na^+, K^+, Mg^{++} et Ca^{++} conduisent aux valeurs suivantes (tabl. 15).

Il peut être remarqué que les quantités d'éthane 1,2 diol retenues à $p = p_o$ sont reliées à la chaleur d'hydratation des cations par :

$$y = 25 \text{ p. } 100 + \frac{0{,}037}{v} Q_H$$

où v représente la valence de l'ion.

TABLEAU 15

Quantités maximales d'éthane 1,2 diol interfoliaire retenues à 20 °C par la montmorillonite

Cation	Q^{ED} retenues	Chaleur d'hydratation (Q_H) (Basolo et Pearson, 1960)
K^+	28 p. 100	79
Na^+	28,7 p. 100	100
Ca^{++}	32 p. 100	382
Mg^{++}	33,6 p. 100	464

Ainsi, en l'absence de cations compensateurs ($Q_H = 0$), la quantité d'éthane 1,2 diol fixée par la montmorillonite étudiée dans ce travail, serait de 25 p. 100. En supposant un recouvrement total des surfaces de l'argile (800 m^2), cette quantité conduit à un encombrement moléculaire moyen de 32,9 $Å^2$, valeur très voisine de la surface de base d'un parallélépipède contenant une molécule gauche d'éthane 1,2 diol (31 $Å^2$). Il s'ensuit que l'éthane-diol assurerait presque totalement le recouvrement des surfaces quand sa pression de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante.

Il en résulte que la variation des quantités d'éthane 1,2 diol interfoliaire correspond à un encombrement moléculaire différent selon la nature du cation compensateur. Cette valeur sera d'autant plus faible que la chaleur d'hydratation du cation sera plus grande.

En conclusion, l'utilisation de l'éthane 1,2 diol pour mesurer la surface totale d'une argile doit être considérée comme une méthode test, c'est-à-dire que l'on devra toujours opérer dans les mêmes conditions et n'utiliser les résultats que pour des comparaisons.

5.4. — *Modèle d'action de la matière organique dans les sols*

L'étude des systèmes prétraités a mis en évidence que les propriétés de rétention de l'eau par la montmorillonite calcique dépendaient de la localisation de la matière organique. C'est ainsi que la présence de produit organique dans l'espace interfoliaire se traduit par une diminution de la rétention d'eau. Inversement, la présence de matière organique dans l'espace interagrégat se manifeste par une augmentation de la fixation d'eau.

Toutefois l'intensité de ces 2 actions antagonistes de la matière organique dépend de la taille des molécules. En effet, aux fortes humidités relatives, l'action de rétention exercée par les macromolécules est beaucoup plus faible que celle observée avec les molécules de petite taille. Ceci est dû, d'une part à l'existence d'une compétition interfoliaire importante et, d'autre part à la faible affinité des macromolécules pour l'eau.

Pour tenter de généraliser nos résultats à la matière organique des sols, il est important de connaître l'origine des actions de compétition qui apparaissent dans le sol puisque l'on sait qu'il existe de la matière organique interagrégat qui sera responsable des phénomènes de rétention d'eau.

5.41. *Action de compétition.*

Dans notre étude, la diminution de la rétention d'eau est due à l'apparition d'associations stables entre la montmorillonite et le composé organique. Ceci correspond à la réalisation de liaisons argile-matière organique au détriment des liaisons préexistantes eau-argile. Dans un sol, 2 types de compétitions peuvent apparaître.

a) *Compétition au niveau des surfaces externes des colloïdes minéraux.*

Il est en effet bien connu que la matière organique et les colloïdes minéraux du sol interréagissent pour former le complexe « argilo-humique ». Bien que de nombreux travaux aient été réalisés sur les complexes organiques, les interactions entre la matière organique et les constituants des sols sont bien moins connues. Quelques grandes conclusions peuvent être cependant tirées (Greenland, 1965*b*, 1971) :

— Les acides humiques et les acides fulviques sont adsorbés par les minéraux argileux par l'intermédiaire des cations polyvalents ou des groupes silanols.

— Les acides fulviques ne sont pas adsorbés dans l'espace interfoliaire des argiles tant que le pH est supérieur à 4 (Schnitzer et Kodoma, 1967 ; Kodoma et Schnitzer, 1968 ; Schnitzer, 1969 ; Schnitzer et Khan, 1972).

— Les composés organiques des sols sont fortement adsorbés par les oxydes de fer et d'aluminium mal cristallisés (Inoue et Wada, 1968 ; Parfitt et Greenland, 1970 ; Saini et MacLean, 1966).

En résumé, une fraction de la matière organique sera localisée sur les surfaces externes des colloïdes minéraux.

b) *Compétition au niveau de la matière organique.*

Dans tout ce qui précède, on ne s'est intéressé qu'aux phénomènes de compétition dus à des interactions privilégiées entre la matière organique et les argiles. Il est cependant bien connu que la dessication des matières organiques du sol modifie profondément leurs propriétés d'hydratation (Van Dijk, 1971).

Cette propriété de la matière organique est expliquée par l'apparition de liaisons matière organique-matière organique qui remplacent les liaisons matière organique-eau préexistantes. De plus, l'irréversibilité de cette réaction sera d'autant plus marquée que la taille des molécules sera grande, car la probabilité pour que toutes les liaisons du type matière organique-matière organique soient rompues simultanément par l'eau, est très faible (Greenland, 1972). Il s'ensuit qu'au cours des cycles d'humectation-dessication des sols, les molécules de grande taille seront de moins en moins aptes à retenir l'eau.

5.42. *Enoncé du modèle d'action de la matière organique.*

D'après ce qui précède, les molécules responsables de la rétention d'eau interagrégat ne doivent pas contracter de liaisons avec l'argile ou la matière organique·

Cette dernière condition impose donc que la taille des molécules ne soit pas trop importante.

Dans les sols, l'augmentation de la capacité de rétention de l'eau ne pourra donc être assurée que par les molécules de petite taille car, d'une part elles sont très efficaces pour abaisser le potentiel chimique de l'eau et, d'autre part les molécules de grande taille auront tendance à former des liaisons du type matière organique-matière organique.

Ceci revient donc à admettre que, seule une fraction de la matière organique assure l'essentiel d'une fonction. Dans notre cas, l'influence des molécules de grande taille sur la rétention de l'eau sera négligeable devant celle assurée par les molécules de petite taille.

5.43. *Critiques du modèle proposé.*

La nature des résultats obtenus dans ce travail conduisait obligatoirement à proposer un modèle où n'intervient que la taille des molécules car on a étudié l'influence de composés polaires de même nature chimique. Or, il est connu que, d'une part l'adjonction au sol de composés organiques de synthèse de poids moléculaire équivalent pouvait entraîner des résultats très différents selon leur nature chimique et leur structure (Bozer *et al.*, 1969), et d'autre part les composés organiques du sol présentent des fonctions ionisables (fonctions carboxyliques et phénoliques).

On peut cependant penser que la composition chimique jouera assez peu dans un sol car la composition élémentaire, les différents composés chimiques constitutifs et les groupements fonctionnels de la matière organique varient peu avec l'origine pédoclimatique. De plus, l'effet d'une matière organique sur une propriété physique d'un sol sera la somme des contributions élémentaires produites par les composés de structures différentes mais pour chacun desquels l'efficacité dépendra de la taille. On peut donc admettre que les modifications des propriétés physiques d'un sol dues aux variations de la nature chimique moduleront celles produites par des distributions différentes des poids moléculaires.

Par contre, en ce qui concerne les fonctions ionisables portées par la matière organique des sols, aucune conclusion ne peut être tirée des résultats obtenus dans ce travail. Il est donc impératif d'entreprendre des recherches analogues à celles décrites précédemment mais où la molécule organique apportée représentera bien une matière organique de sol, extrait de tourbe par exemple.

Chapitre VI. Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier l'influence d'une molécule organique sur les propriétés d'hydratation de la montmorillonite. Toutefois, et dès le début, on a montré qu'une telle étude ne pouvait être entreprise que si l'on déterminait préalablement les interactions spécifiques qui apparaissent entre ce minéral, l'eau et les diols de faible poids moléculaire.

En mettant à profit les résultats donnés par les isothermes d'adsorption à partir desquels sont calculés les diagrammes de sélectivité, la diffraction des rayons X et la

spectroscopie infrarouge, on a pu mettre en évidence la coexistence, sur l'argile, d'une phase interagrégat dont la composition est identique à celle de la solution d'équilibre, et d'une phase interfoliaire dont les caractéristiques (composition, structure...) dépendent de la nature du diol étudié.

Ainsi, avec les diols ne contenant que des fonctions alcool primaire, on n'observe que 2 états stables correspondant à une solvatation de l'espace interfoliaire soit par l'eau, soit par le diol. Avec ces produits, l'importance de l'un ou de l'autre état dépend essentiellement de la distance qui sépare les groupements polaires de la molécule : avec l'éthane 1,2 diol, la solvatation de l'espace interfoliaire par l'eau est très réduite alors qu'avec le butane 1,4 diol, la solvatation de l'espace interfoliaire par le diol est inexistante.

Par contre, avec les diols contenant 1 ou 2 fonctions alcool secondaire, on note l'apparition de plusieurs états stables correspondant à des associations particulières. Parmi les produits étudiés, différents types de complexes interfoliaires ont pu être mis en évidence :

— solvatation de l'argile soit par l'eau, soit par le diol,

— solvatation des cations par le diol et remplissage de l'espace interfoliaire par l'eau,

— solvatation de l'espace interfoliaire par le diol mais où l'eau assure des liaisons intermoléculaires.

Pour ces différents produits, les états stables mis en évidence s'expliquent par les énergies mises en jeu par les interactions dominantes qui s'exercent sur la surface de l'argile, en particulier, les interactions cations-dipole et les liaisons hydrogène intermoléculaires. Ces résultats constituent donc une généralisation des conclusions obtenues à partir des études sur l'hydratation des argiles.

C'est en partant de cette connaissance que l'on a pu interpréter l'hydratation de la montmorillonite contenant un composé organique dont la présence, rappelons-le, se traduit par une diminution, puis par une augmentation de la fixation d'eau quand la teneur en matière organique croît.

Dans tous les cas et quelle que soit la taille du composé organique utilisé, la fixation d'eau diminue par suite de l'adsorption interfoliaire de la molécule organique (compétition interfoliaire) alors qu'elle augmente grâce à la présence de produit organique dans l'espace interagrégat (adsorption interagrégat ou interparticulaire). Dans ce cas, la matière organique interagrégat se traduit par une augmentation de la part prise par la porosité dans la rétention de l'eau par l'argile.

Néanmoins, si les mécanismes restent les mêmes quelle que soit la taille de la molécule organique, les modalités en sont très différentes. C'est en partant de cette observation et en raisonnant par analogie que l'on a pu proposer un modèle d'action des matières organiques des sols. Dans ce modèle, on est amené à faire jouer un rôle prépondérant à une fraction de la matière organique vis-à-vis d'une propriété donnée, par exemple les molécules peu polymérisées, pour la rétention de l'eau (compétition réduite, fixation interagrégat importante). Il est évident que ce modèle ne s'applique uniquement qu'à la fraction humifiée de la matière organique.

Pour terminer, analysons les apports de ce travail quant à l'objectif fixé au départ. Deux positions peuvent se dégager :

— le but fixé n'a été qu'incomplètement atteint puisque la vérification du modèle d'action des matières organiques sur les propriétés des sols doit être testé et vérifié sur des systèmes naturels ;

— le but fixé a été dépassé puisqu'il a permis d'une part, de généraliser les études déjà faites sur l'argile ou de préciser certaines hypothèses et, d'autre part, de proposer un modèle d'action des matières organiques s'appliquant à d'autres propriétés.

Il est évident que ces 2 attitudes doivent être complémentaires pour un développement ultérieur de recherches dans lesquelles ce travail constituera un maillon.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Study of the interactions between calcium montmorillonite, water and diols
Hydration of the montmorillonite-diol complexes

Part II. — Influence of diols on the hydration characteristics of the montmorillonite

The isotherms of water adsorption by the montmorillonite-diol complexes show that these organic molecules induce either inter layer competition (substitution of diol for interlayer water) or inter-aggregate retention (hydration of the non-adsorbed diol). It was proved that the relative intensity of these two antagonistic effects of diols depends on the quantity of organic matter supplied, the molecular weight of diol and the relative humidity at which equilibrium was reached.

After giving a general interpretation of the hydration of these complexes and arguing from analogy, a model of action of the humic substances on the soil characteristics is suggested. All the results obtained by this research work allow moreover :

— to stress the importance of the inter-aggregate space in the hydration mechanisms of clays,

— to draw the attention on the difficult interpretation on the results obtained by the classical method used for determining the area of the total surface of a clay,

— to precise the polymer structure in adsorbed condition when the overlap rate of the surface of the adsorbing agent increases.

---

(1) The first part of this research work was published in the « Annales agronomiques », 1976, 27 (4), p. 367-415.

Zusammenfassung

Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kalziummontmorillonit, Wasser und Diolen
Hydratation der montmorillonit-diole komplexe

Zweiter Teil : Einfluss der Diole auf die Hydratationseigenschaften des Montmorillonits

Die Isothermen der Wasser adsorption durch Montmorillonit-Diol Komplexe zeigen, dass diese organischen Moleküle entweder eine Konkurrenz zwischen den Blättchen (Ersetzen des zwischen den Blättchen liegenden Wassers durch Diol) oder ein Interaggregatzurückhalten (Hydratation des nicht adsorbierten Diols) hervorrufen. Es wurde gezeigt, dass die relative Intensität dieser beiden entgegenwirkenden Einflusse der Diole von der Menge der zugeführten organischen Substanz, dem Molekulargewicht des Diols und der für das Gleichgewicht nötigen relativen Feuchtigkeit abhängt.

Nachdem eine generelle Erklärung der Hydratation dieser Komplexe gegeben und eine analoge Schlussfolgerung gemacht wurde, wird ein Muster für die Wirkung der humischen Substanzen auf die Bodeneigenschaften vorgestellt. Die gesamten durch diese Untersuchung gelieferten Ergebnisse erlauben auch :

— die Bedeutung des Interaggregatraums in den Hydratationsmechanismen der Tone hervorzuheben,

— auf die schwierige Erklärung der durch die klassische Methode gelieferten Ergebnisse, die

für die Bestimmung des Flächenraums der ganzen Fläche eines Tons benutzt ist, aufmerksam zu machen,

— die Struktur der Polymeren in adsorbiertem Zustand festzulegen, wenn der Deckungsgrad der Oberfläche der adsorbierenden Substanz steigt.

Der erste Teil dieser Arbeit ist in den « Annales agronomiques » 1976, 27 (4), 367-415.

РЕЗЮМЕ

Изучение взаимодействия между известковым монтмориллонитом водой и диолами. Оводнение комплексов монтмориллонит-диолы. — II. Влияние диолов на свойства оводнения монтмориллонита.

П. ШАССЕН.

Изотермы адсорбции воды комплексами монтмориллонит-диолы показывают, что эти органические молекулы индуцируют, или явления межпластового соревнования (замещение межпластовой воды диолами), или-же явления межагрегатного удержания (оводнение не адсорбированного диола). Показано также, что относительная интенсивность этих двух антагонистических действий диолов, зависит от количества внесенного органического вещества, молекулярного веса диола и относительной влажности, при которой получено было равновесное состояние.

После общей интерпретации явления оводнения этих комплексов и, основываясь на рассуждении по аналогии, автор предлагает модель действия гуминовых веществ на свойства почв. И, наконец, обобщая полученные в данной работе результаты, предлагается :

— подчеркнуть важность межагрегатного пространства для механизмов оводнения глин;

— обратить внимание на трудности интерпретации результатов полученных с помощью классического метода, применяемого при определении общей площади поверхности глины;

— уточнить строение полимеров находящихся в адсорбированном состоянии, когда процент покрытия поверхности адсорбента увеличивается.

Annexe

Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités

Sur toutes les figures, les différentes isothermes ont la signification suivante :

— isotherme n° 1 : Quantités d'eau fixées par les systèmes prétraités ;

— isotherme n° 2 : Quantités de diol fixées par les systèmes prétraités ;

— isotherme n° 3 : Quantités d'eau fixées par les systèmes non traités ;

— isotherme n° 4 : Quantités de diol fixées par les systèmes non traités ;

— isotherme n° 5 : Quantités d'eau fixées par la montmorillonite calcique en absence de matière organique.

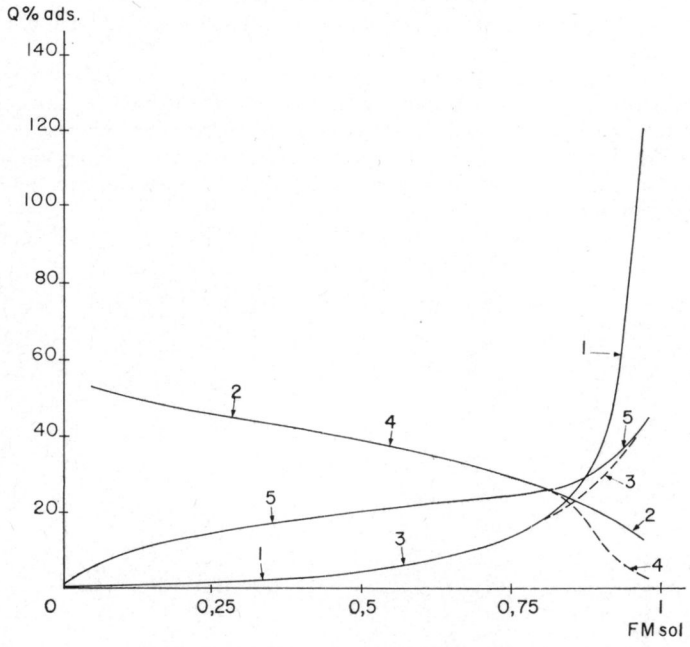


FIG. A. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas de l'éthane 1,2 diol).*

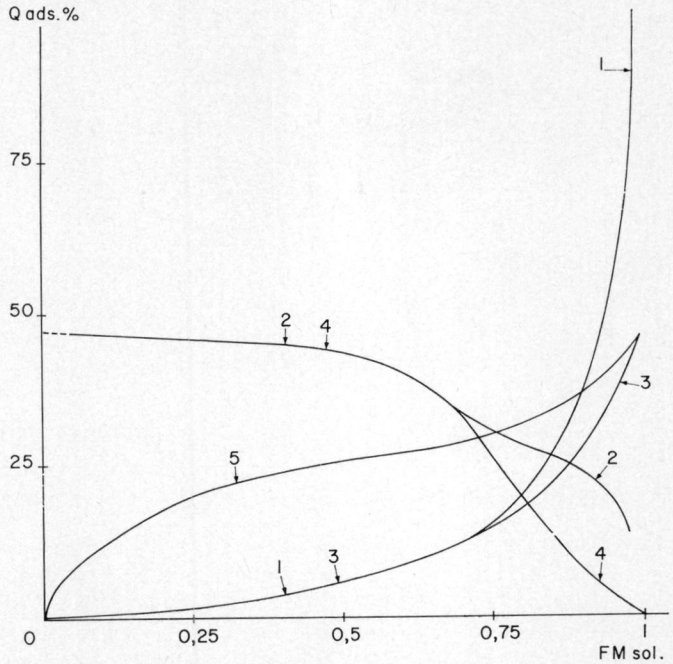


FIG. B. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas du propane* 1,2 *diol).*

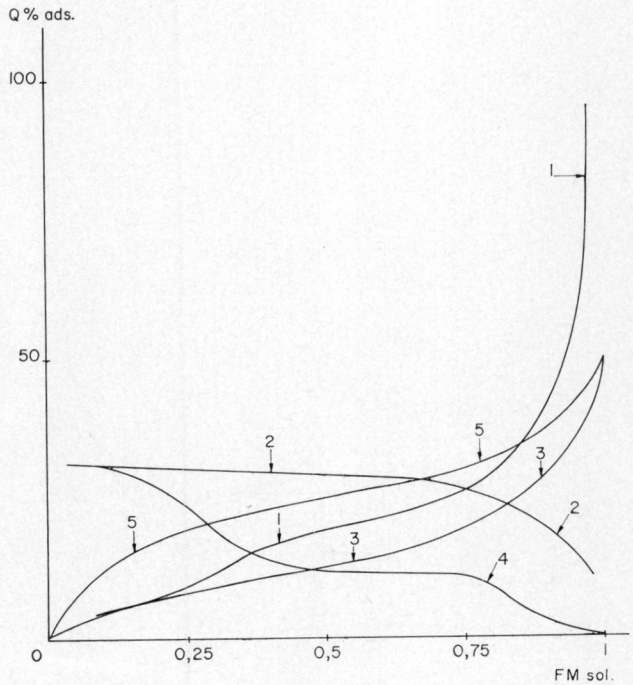


FIG. C. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas du butane* 1,4 *diol).*

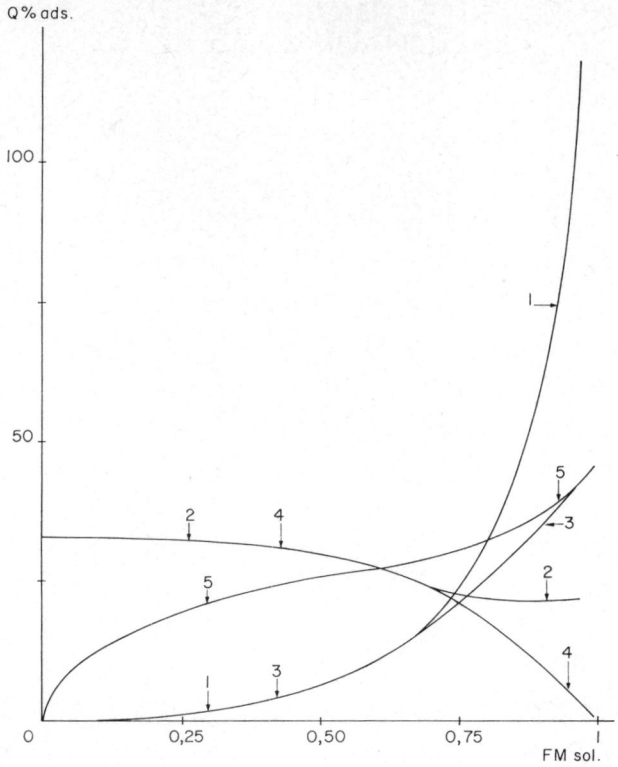


FIG. D. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas du butane 1,3 diol).*

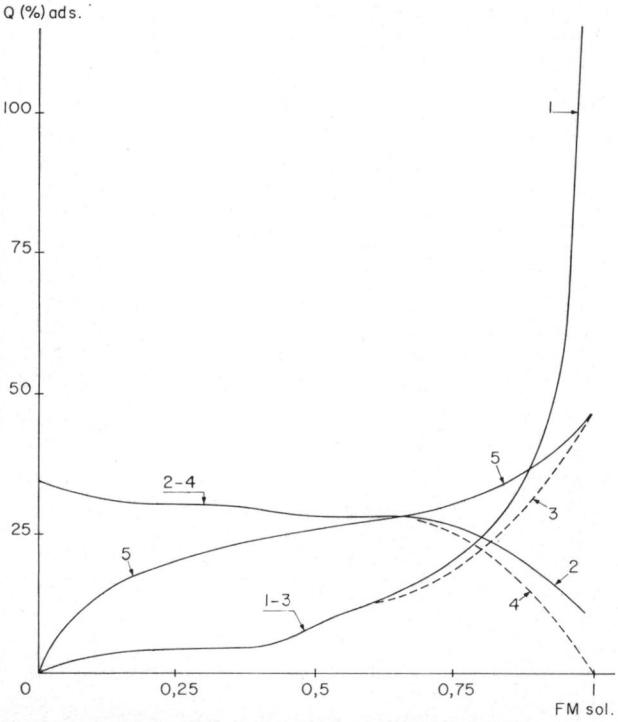


FIG. E. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités. (cas du butane 2,3 diol).*

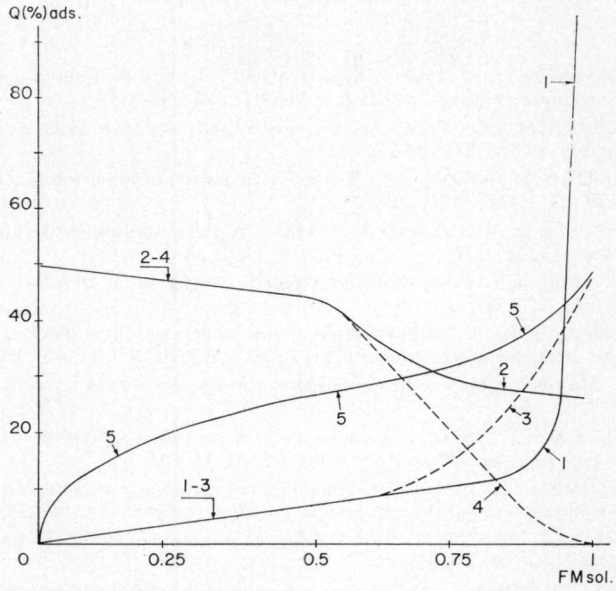


FIG. F. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas du diéthylèneglycol).*

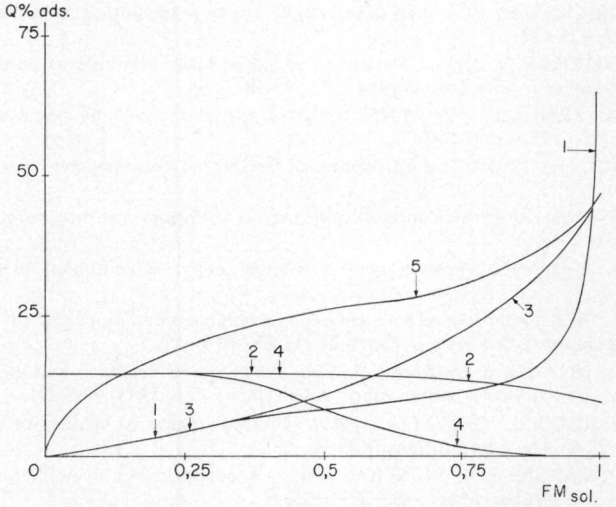


FIG. G. — *Isothermes d'adsorption des systèmes prétraités et non traités (cas du triéthylèneglycol).*

Références bibliographiques

BOWER C. A., GSCHWEND F. B., 1952. Ethylene glycol retention by soils as a mesure of surface area and interlayer swelling. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **16,** 342-345.

BOWER C. A., GOERTZEN J. O., 1959. Surface area of soils and clays by an equilibrium ethylene glycol method. *Soil Sci.*, **87,** 289-292.

BOZER K. B., BRANDT G. H., HEMWALL J. B., 1969. Chemistry of materials that make soils hydrophobic. *Calif. US*, Univ. Calif., 189-204.

BRADLEY W. F., WEISS E. J., ROWLAND R. A., 1963. A glycol sodium vermiculite complex. *Clays and Clay Min.*, **10,** 117-122.

BRINDLEY G. W., 1965. Ethylene glycol and glycerol complexes of smectites and vermiculites. *Clay Miner.*, **6,** 237-259.

BRINDLEY G. W., WIEWIORA K., WIEWIORA A., 1969. Intercrystalline swelling of montmorillonite in some water organic mixtures (Clay organic studies, XVII). *Amer. Min.* **54,** 1635-1644.

CALVET R., 1972. *Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs.* Thèse Fac. Sci. Paris.

CLAYFIELD E. J., LUMB E. C., 1974*a*. The simulation of random copolymer adsorption. I. Lattice model using a computer. *J. Colloïd and Interf. Sci.*, **47** (1), 6-15.

CLAYFIELD E. J., LUMB E. C., 1974*b*. The simulation of random copolymer adsorption. II. Loop formation and segment density distribution *J. Colloïd and Interf. Sci.*, **47** (1), 16-26.

DAVIS C. E., AHMAD N., JONES R. L., 1971. Effect of exchangeable cations on the surface area of clays. *Clay Miner.*, **9,** 258-261.

DI MARZIO E., MAC CRACKIN F. L., 1965. One dimensional model of polymer adsorption. *J. Chem. Phys.*, **43,** 539-547.

DOWDY R. H., 1966. *Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces.* Thèse Michigan State University.

DOWDY R. H., MORTLAND M. M., 1968. Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces. II. Ethylene glycol. *Soil Sci.*, **105,** 36-48.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1950. Total surface of clay in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69,** 421-432.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1952. Formation of mixed layer minerals by potassium fixation in montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **16,** 45-48.

ELTANTAWY I. M., ARNOLD P. W., 1974. Ethylene glycol sorption by homoionic montmorillonites. *J. Soil Sci.*, **25** (1), 99-110.

FRISCH H. L., SIMHA R., 1954. The adsorption of flexible macromolecules. II. *J. Phys. Chem.*, **58,** 507-512.

FRISCH H. L., 1955. Polymer chain configuration near a boundary exerting forces. *J. Phys. Chem.*, **59,** 633-636.

GLAESER R., 1953. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* 68 p. Thèse Fac. Sci. Paris.

GREENLAND D. J., 1972. Interactions between organic polymers and inorganic soils particles. *Meded. Fac. Landbouwwetensch Rijksuniv.* Gent, **37** (3), 897-914.

HAGYMASSY J., BRUNAUER S., MIKHAIL R. SH., 1969. Pore structure analysis by water vapor adsorption. I. t. curves for water vapor. *J. Coll. Interf. Sci.*, **29** (3), 485-491.

HENIN S., CHAUSSIDON J., CALVET R., 1969. Surface, forme et croissance des minéraux des argiles. *Bull. Groupe Franç. Argiles*, XXI, 31-45.

HOEVE C. A. J., DI MARZIO E. A., PEYSER P., 1965. Adsorption of polymer molecules at low surface coverage. *J. Chem. Phys.*, **42,** 2558-2563.

INOUE T., WADA K., 1968. Adsorption of humified clover extracts by various clays. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci.*, Adelaide, 289-298.

KODAMA H., SCHNITZER M., 1968. Effects of interlayer cations on the adsorption of a soil humic compound by montmorillonite *Soil Sci.*, **106,** 73-74.

MAC NEAL B. L., 1964. Effect of exchangeable cations on glycol retention by clay minerals. *Soil Sci.*, **97,** 96-102.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite. Propriétés diélectriques et structure du film d'eau.* Thèse Fac. Sci. Paris.

MAMY J., GAULTIER J. P., 1972. Applications des mesures de conductivité electrique à l'étude de l'eau fixée par des phyllites gonflantes. *Bull. Groupe Franç. Argiles*, XXV, 43-51.

MOTOMURA K., NATUURA R., 1969. Conformation of adsorbed polymeric chains. *J. Chem. Phys.*, **50,** 1281-1287.

PARFITT R. L., GREENLAND D. J., 1970. The adsorption of polyetheneglycols on clay minerals. *Clay Minerals*, **8,** 306-315.

PROST R., 1975. *Etude de l'hydratation des argiles : interactions eau-mineral et mécanismes de la rétention de l'eau.* Thèse Fac. Sci. Paris.

REYNOLDS R. C., 1965. An X-Ray study of an ethylene glycol montmorillonite complex. *Amer. Min.*, **50,** 990-1001.

ROE R. J., 1965. Conformation of an isolated polymer molecule at an interface. II. Dependence on molecular weight. *J. Chem. Phys.*, **43,** 1591-1598.

SAINI G. R., MACLEAN A. A., 1966. Adsorption flocculation reactions of a soil polysaccharide with kaolinite. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **30,** 697-699.

SCHNITZER M. et KODAMA H., 1967. Reactions between a podzol fulvic acid and Na-Montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 632-636.

SCHNITZER M., 1969. Reactions between fulvic acid, a soil humic compound, and inorganic soil constituents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33** (1), 75-81.

SCHNITZER M., KHAN, 1972. *Humic substances in the environment*, 327 p., Marcel Dekker, Inc., New York.

SILBERBERG A., 1962*a*. Adsorption of flexible macromolecules. I. The isolated macromolecule at a plane interface. *J. Phys. Chem.*, **66,** 1872-1883.

SILBERBERG A., 1962*b*. Adsorption of flexible macromolecules. II. The shape of the adsorbed molecule ; the adsorption isotherm, surface tension. *J. Phys. Chem.*, **66,** 1884-1907.

SIMHA R., FRISCH H. L., EIRICH FR., 1953. Adsorption of flexible macromolecules. *J. Phys. Chem.*, **57,** 584-589.

VAN DIJK H., 1971. Colloïd chemical properties of humic matter in *Soil Biochemistry*, **2,** 16-35, Marcel Dekker, Inc., New York.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 45-46.

Dispersion hydrodynamique dans des colonnes de sol homogène

Note de la rédaction

Les deux articles qui suivent ont tous deux comme préoccupation la détermination des paramètres caractéristiques du fonctionnement hydrodynamique d'une colonne de sol homogène lors du transfert d'un soluté au travers de cette colonne. Ils émanent de deux équipes de recherche qui, se référant à la même étude générale *, manifestent un intérêt analogue à la détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique d'un milieu poreux homogène.

La première étude expose la méthodologie de la détermination de ce coefficient en milieu saturé, et insiste sur les précautions expérimentales à prendre, face à la sensibilité des modèles mathématiques de détermination. On y compare les résultats de plusieurs méthodes, tant sur le plan expérimental que sur celui des calculs afférents.

La seconde étude, qui présente une méthode de calcul simple et efficace, souligne aussi l'intérêt porté par ses auteurs à la détermination du volume poral apparent de la colonne de sol. Ce paramètre, souvent utilisé pour la description globale de l'architecture du milieu poreux (qui conditionne par exemple l'efficacité d'un lessivage), traduit aussi l'accessibilité au soluté de l'ensemble de l'eau du sol, avec une meilleure précision que les mesures qui pourraient être faites dans des conditions statiques en l'absence du déplacement du soluté.

(*) Calvet R. et Graffin Ph. : Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. agron.*, 1974, **25** (2-3), 123-155.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 47-64.

Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal dans un milieu poreux saturé

J. LE RENARD, R. CALVET, Colette TOURNIER, Agnès HUBERT

Station de Science du Sol, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles

Résumé

Après une définition des paramètres caractéristiques de la dispersion hydrodynamique, deux méthodes sont décrites pour la mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique : méthodes de l'échelon de concentration et méthode de l'impulsion. Plusieurs modes d'exploitation des résultats sont présentés (exploitation graphique, ajustements numériques). Des exemples sont donnés dans le cas d'une solution d'atrazine et d'un milieu poreux constitué de billes de verre. Il apparaît que les deux principales méthodes exposées donnent des résultats comparables, et que la précision des mesures est d'autant meilleure que la vitesse d'écoulement est plus faible.

L'importance des phénomènes de transport d'eau et de soluté dans les sols est un fait reconnu tant en agronomie que pour les problèmes liés à la protection de l'environnement. La détermination des caractéristiques des déplacements miscibles dans les sols est donc indispensable pour connaître les variations de la concentration d'un soluté dans l'espace et dans le temps. Parmi les nombreux paramètres qu'il importe d'étudier, le coefficient de dispersion hydrodynamique est le plus important. L'objet de cette publication est de comparer deux méthodes de mesure de ce coefficient dans le cas simple d'un milieu poreux modèle à spectre de porosité unimodal, saturé en eau. Toutefois, avant d'aborder l'analyse de ces méthodes, il est nécessaire de rappeler la nature et le rôle des différentes variables qu'il faut prendre en considération.

I. — Paramètres caractéristiques de la dispersion hydrodynamique

La répartition d'un traceur, représentée par sa fonction de concentration C (fonction du temps et de l'espace), se déduit du flux $\vec{J}$ de ce soluté par une équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \operatorname{div} \vec{J} + F_p^s$$

où F_p^s est une fonction du temps et de l'espace traduisant l'existence éventuelle de sources ou de puits de traceur (adsorption, désorption, réaction chimique...).

Le flux $\vec{J}$ se compose en chaque point de trois parties :

— un flux de convection, traduisant l'entraînement à une vitesse moyenne $\vec{v}$ du soluté traceur de concentration C :

$$\vec{J_c} = \vec{v}\, C ;$$

— un flux de diffusion moléculaire, proportionnel au gradient de concentration au point considéré :

$$\vec{J_D} = - D \overrightarrow{\text{grad}}\, C ;$$

— un flux de dispersion mécanique, lié à l'existence d'une répartition des vitesses tant à l'intérieur même de chaque pore que dans les différents pores ; cette répartition provoquant des gradients de concentration, on peut considérer le flux de dispersion mécanique comme l'analogue d'un flux de diffusion (« flux de diffusion convective », de Bear, 1969), et l'exprimer comme :

$$\overrightarrow{J_{DM}} = - D_M \overrightarrow{\text{grad}}\, C.$$

Le flux combiné

$$\vec{J_H} = \vec{J_D} + \overrightarrow{J_{DM}}$$

est à l'origine du phénomène de *dispersion hydrodynamique*. Celui-ci se traduit par le fait que, s'il existe un interface entre deux zones du milieu poreux de part et d'autre duquel existe à un instant donné un certain écart de concentration, cet interface va évoluer avec le temps en une zone de transition dans laquelle les gradients de concentration vont tendre à s'annuler.

L'équation de conservation de la masse s'écrit donc :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \text{div} \left\{ \vec{v}\, C - D_H \overrightarrow{\text{grad}}\, C \right\} + F_p^s, \qquad \text{où } D_H = D + D_M$$

D_H est le tenseur de dispersion hydrodynamique.

Dans ce qui suit, nous ne considèrerons que des déplacements miscibles pour lesquels $F_p^s = 0$, donc où le transport du soluté se fait sans échanges avec la phase solide.

Pour un déplacement monodimensionnel (l'axe des x étant dirigé suivant l'axe de la colonne), l'équation prend la forme :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Ici, la nature tensorielle de D_H (et de D et D_M) n'apparaît plus, et l'on considère souvent ces quantités comme de simples coefficients. Ainsi D_H est-il le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal. Ceci n'est cependant qu'une approximation puisque les composantes normales à l'axe des x ont une action non nécessairement négligeable sur la répartition du traceur le long de la colonne.

Le coefficient de diffusion moléculaire D est, pour un milieu poreux, proportionnel au coefficient de diffusion moléculaire du traceur D_0 dans la phase liquide, et à la tortuosité $\mathcal{C}$ du milieu :

$$D = k\,\mathcal{C}\,D_0$$

où k est un coefficient représentant l'interaction entre le soluté et la phase solide ; pour un milieu poreux non adsorbant (billes de verre, sable), $k = 1$.

Le coefficient de dispersion mécanique D_M s'exprime en fonction de la vitesse moyenne dans les pores $\bar{v}$ et de caractéristiques géométriques de l'espace poral. Selon la description que l'on donne de cet espace, la formulation de D_M varie ; de plus, selon que la nature tensorielle de D_M est ou non prise en compte, on trouve que D_M s'exprime en fonction d'une puissance de $\bar{v}$ variant de 1 à 2. Par exemple, Aris (1956) donne l'expression de D_M pour un milieu poreux constitué de capillaires de section quelconque :

$$D_M = D_0 + \frac{\delta \bar{R}^2\,\bar{v}^2}{D_0}$$

où δ est un facteur de forme des capillaires et $\bar{R}$ leur rayon moyen. D'autres expressions sont données dans la littérature (de Wiest, 1969).

Le coefficient de diffusion moléculaire en phase liquide D_0 peut être considéré comme indépendant de la concentration lorsque celle-ci est suffisamment faible (10^{-6} à 10^{-3} M, d'après Lindstrom *et al.*, 1967). On peut alors écrire, puisque D_H est indépendant de C pour des solutions diluées :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v}\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (1)$$

Le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal D_H dépend de D_0, de $\bar{v}$, et d'une caractéristique géométrique d représentative du milieu poreux (rayon moyen des pores, ou diamètre des particules constituant ce milieu). Cependant aucune relation générale du type

$$D_H = f(D_0, \bar{v}, d)$$

n'a encore été proposée.

L'analyse dimensionnelle portant sur $D_H[L^2\,T^{-1}]$, $D_0[L^2\,T^{-1}]$, $\bar{v}[LT^{-1}]$, et d[L] montre que le système des 4 paramètres D_H, D_0, $\bar{v}$ et d est caractérisé par deux grandeurs sans dimension :

$$\frac{\bar{v}d}{D_H} \text{ et } \frac{\bar{v}d}{D_0} \quad \text{(nombres de Péclet), ou par} \quad \frac{\bar{v}d}{D_0} \text{ et } \frac{D_H}{D_0}.$$

La forme la plus caractéristique des interrelations entre les 4 paramètres se traduira donc par exemple par la relation :

$$\frac{D_H}{D_0} = g\left(\frac{\bar{v}d}{D_0}\right)$$

et c'est pourquoi les efforts ont d'abord porté sur l'étude d'une telle relation, à partir du nombre de points expérimentaux le plus grand possible. L'expérience correspon-

dante doit permettre, pour un certain nombre de valeurs de D_0 (donc pour un certain nombre de traceurs), de mesurer les valeurs de D_H pour une combinaison de valeurs de d (colonnes constituées de billes de verre de différents diamètres par exemple) et de $\bar{v}$ (variation du débit de la solution de traceur dans chacune des colonnes).

II. — Méthodes expérimentales de mesure de D_H

Il suffit, pour mesurer D_H, d'étudier une expérience gouvernée par l'équation (1) et dont on maîtrise les conditions initiales et aux limites, de façon à disposer d'une solution de (1) permettant l'interprétation des résultats.

L'expérience la plus simple consiste, à partir d'une colonne de milieu poreux préalablement saturée par une solution de concentration C_i en traceur, à faire circuler dans cette colonne à partir de l'instant t_0 une solution de concentration C_e en traceur, avec un débit d'alimentation constant imposé par une charge hydraulique constante ou mieux par une pompe. C'est la méthode dite de l'échelon, ou de l'alimentation continue en traceur. On recueille la solution sortant de la colonne avec un collecteur de fractions afin de disposer de la courbe : concentration de l'effluent C_s en fonction du temps (dite courbe d'élution) ; l'expérience prend fin lorsque $C_s = C_e$.

Une variante du procédé précédent permet en fin d'expérience de laisser la colonne identique à ce qu'elle était au début. On fait circuler dans la colonne saturée par la solution initiale (C_i) une autre solution (C_e) entre les temps t_0 et t_m, puis on fait circuler une solution (C_i) avec le même débit que pour la précédente. L'expérience prend fin lorsque C_s, après être passé par un maximum C_M, redevient égal à C_i. C'est la méthode dite du créneau d'alimentation, ou de l'alimentation discontinue en traceur, ou de l'impulsion (fig. 1). Cette méthode donne des résultats d'autant plus facilement interprétables que C_s passe au cours du temps par un maximum C_M plus proche de C_e ; ceci suppose un choix judicieux de la durée de l'impulsion (t_m-t_0).

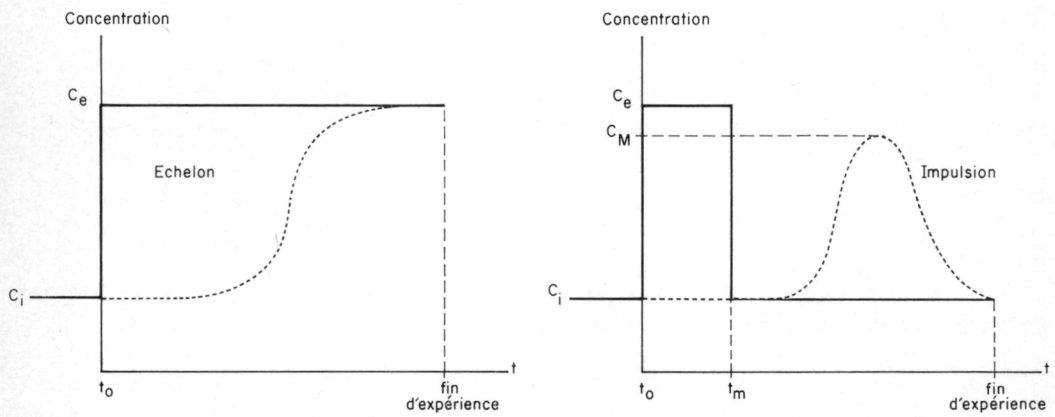


FIG. 1. — *Méthodes de l'alimentation continue et discontinue en traceur.*

En traits pleins : fonction d'alimentation de la colonne.
En pointillés : courbes d'élution (mesures des concentrations à la sortie de la colonne).

III. — Montage expérimental

L'appareillage (fig. 2) comporte :

— Un dispositif d'alimentation, comprenant deux réservoirs contenant les solutions aux concentrations C_i et C_e, un système de raccordement de ces réservoirs, et une pompe péristaltique à débit réglable.

— Une colonne, alimentée par le bas, avec un dispositif permettant de purger l'espace mort d'alimentation, et raccordée à l'un des réservoirs par l'intermédiaire soit de la pompe, soit d'une seringue de purge S1 ou S2.

— Un système d'échantillonnage de la solution à la sortie de la colonne, avec un collecteur de fractions commandé par un siphon ou par un compteur de gouttes.

IV. — Détermination de D_H à partir d'une courbe d'élution

Deux cas peuvent se présenter suivant la méthode utilisée.

A. — *Méthode de l'échelon*

1) *Approximation de la colonne semi-infinie.*

On suppose ici que la longueur de la « colonne » est telle qu'à son extrêmité, la concentration reste toujours égale à C_i. Nous nous intéresserons à la concentration C_L en un point de la colonne situé à une distance L du point d'alimentation. Nous ferons l'approximation que la concentration C_s que nous observons à l'extrêmité de notre colonne réelle (de longueur L) est telle que C_s est très peu différent de C_L.

Dans ces conditions, on peut écrire, en désignant par C(x, t) la concentration au temps t en un point situé à une distance x du plan d'alimentation de la colonne :

$$\left.\begin{array}{l} C(x = 0,\ t > t_0) = C_e \\ C(x \to \infty,\ t \geqslant t_0) = C_i \end{array}\right\} \text{ conditions aux limites ;}$$
$$C(x \geqslant 0,\ t = t_0) = C_i \quad \text{condition initiale.}$$

La solution de l'équation (1), obtenue par transformation de Laplace par exemple, est pour les conditions précédentes :

$$C(x, t) = C_i + \frac{1}{2}(C_e - C_i)\left\{ \operatorname{erfc} \frac{x - \bar{v}(t - t_0)}{2\sqrt{D_H(t - t_0)}} + \exp\left(\frac{\bar{v}x}{D_H}\right) \operatorname{erfc} \frac{x + \bar{v}(t - t_0)}{2\sqrt{D_H(t - t_0)}} \right\} \tag{2}$$

où

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2)\, dy\ .$$

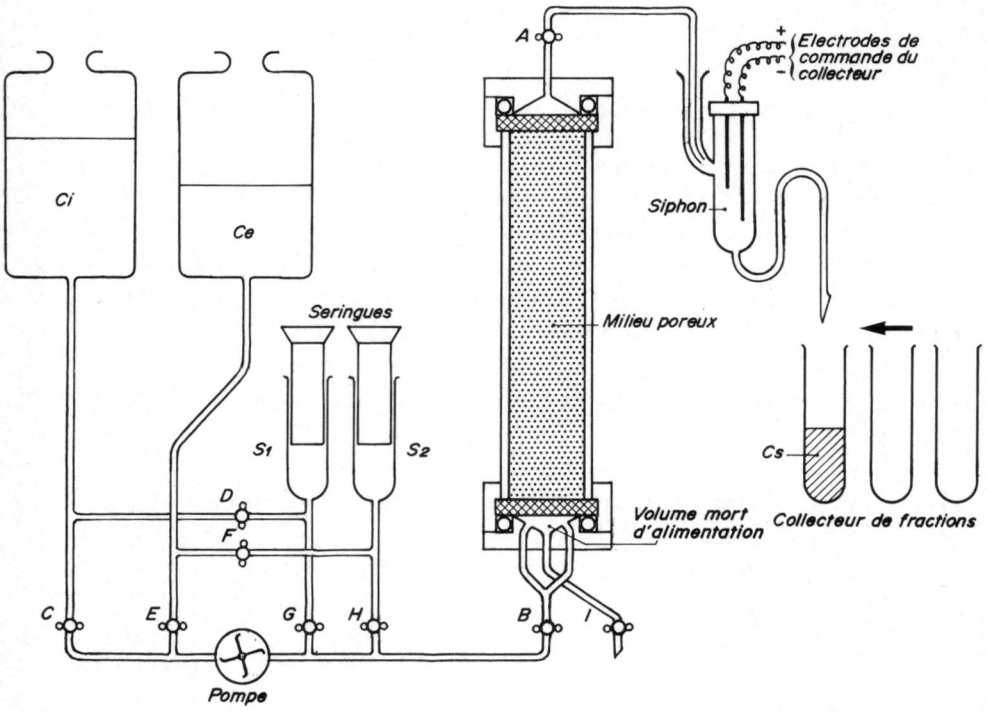


FIG. 2. — *Schéma de l'installation.*

Organigramme d'une expérience (seuls sont mentionnés à un instant donné les robinets ouverts).

Préparation : A, B, C,
Cs = Ci
A, B, C, F, S_2↑
A, B, C
t_0 : H, B, I, S_2↓
A, B, E

Méthode de l'échelon — Méthode de l'impulsion

Cs = Ce — A, B, E, D S_1↑
t_m : G, B, I S_1↓
A, B, C
Cs = C_M

Fin d'expérience ← Cs = Ci

En particulier, pour $x = L$, et en posant $t' = \bar{v}(t - t_0)/L$:

$$C_s(t) = C_i + \frac{1}{2}(C_e - C_i)\left\{ \operatorname{erfc} \frac{1 - t'}{2\sqrt{D_H \frac{t'}{\bar{v}L}}} + \exp\left(\frac{\bar{v}L}{D_H}\right) \operatorname{erfc} \frac{1 + t'}{2\sqrt{D_H \frac{t}{\bar{v}L}}} \right\} \quad (3)$$

Dans l'expérience précédente, on a $\bar{v} = \dfrac{Q}{\varepsilon S}$, où Q est le débit de la pompe, S l'aire de la section de la colonne et ε la porosité du milieu poreux.

La seule inconnue étant donc D_H, on peut la déterminer par ajustement numérique de $C_s(t)$ avec la courbe d'élution observée. Pour cela, on utilise pour valeur initiale de D_H dans l'ajustement une valeur déterminée à l'aide de la méthode graphique de Rose et Passioura (1971).

Ces auteurs ont remarqué que, si l'on trace le graphique de C_s en fonction de t' sur du papier gradué en probabilités (pour C_s) et en logarithmes (pour t'), on obtient, dans la zone où

$$0{,}05 < \frac{C_s - C_i}{C_e - C_i} < 0{,}95 ,$$

un segment de droite, du moins si l'expérience s'est déroulée conformément aux hypothèses faites (pas d'effets de bord, ce qui doit être le cas si le diamètre de la colonne est supérieur à 30 fois le diamètre moyen des particules du milieu poreux ; pas d'effets de gravité, ce qui est vrai pour des solutions diluées ; respect des conditions d'alimentation, donc débit constant ; respect des conditions initiales).

La pente de cette droite, comme le suggère l'expression analytique (3) en tenant compte de la transformation log-normale adoptée, est liée uniquement à $\bar{v}L/D_H$, qui est un nombre de Péclet appelé nombre de Brenner B. La relation proposée par Rose et Passioura s'écrit :

$$\log(B) = 0{,}113\,9\,(\log \alpha)^3 - 0{,}350\,4\,(\log \alpha)^2 + 2{,}362\,3 \log \alpha + 0{,}473\,2$$

où α est la pente de :

$$\mathrm{Ln}(t') = \alpha \operatorname{inverf}\left[2\left(\frac{C_s - C_i}{C_e - C_i}\right) - 1\right] + \beta$$

(inverf(z) étant la fonction réciproque de $\operatorname{erf}(x) = z$).

Cette relation, valable pour B compris entre 16 et 640, permet de calculer, à partir de la mesure de α, la valeur de B, puis lorsqu'on connaît $\bar{v}$, la valeur de D_H. Rose (1973) donne une expression pour $B > 640$:

$$\log(B) = 2{,}001\,05 \log(\alpha) + 0{,}600\,6 .$$

Il est possible alors d'effectuer un ajustement numérique des paramètres $\bar{v}$ et D_H.

On mesure $\bar{v}$ par l'intermédiaire du débit, en mesurant le temps T nécessaire pour recueillir un certain volume V d'effluent (temps s'écoulant entre deux siphonnages par exemple, quand on connaît le volume du siphon) :

$$\bar{v} = \frac{V}{TS\varepsilon} .$$

La mesure de ε, valeur de la porosité de la colonne, peut être faite de façon simple en réalisant une expérience préliminaire du type précédent, où l'on remplace le collecteur de fractions par un récipient (de volume à peu près double de celui de la colonne). On recueille l'effluent entre les temps t_0 et t_2, t_2 étant choisi aussi proche de t_0 que possible mais tel que $C_s(t_2) = C_e$. Si V est le volume recueilli et $\overline{C}$ sa concentration :

$$V\overline{C} = V_p\, C_i + (V - V_p)\, C_e$$

où V_p désigne le volume poral de la colonne ; si $\mathcal{V}$ est le volume réel de la colonne, calculé par les mesures de ses dimensions, $V_p = \mathcal{V}\varepsilon$, d'où la valeur de ε :

$$\varepsilon = \frac{V(\overline{C} - C_e)}{\mathcal{V}(C_i - C_e)}$$

2) *Hypothèse d'une colonne de longueur finie.*

Ici la colonne a une longueur finie L, donc $0 \leqslant x \leqslant L$. La condition initiale est toujours $C(x \geqslant 0, t = t_0) = C_i$.

La condition à la limite $x = 0$ s'écrit en termes de flux :

$$vC_e = vC(x = 0, t > t_0) - D_H \frac{\partial C(0, t)}{\partial x}\,.$$

La condition à la limite $x = L$ a une expression analogue, mais l'expérience montre (Brenner, 1962), qu'il faut y adjoindre la condition de gradient de concentration nul au point de sortie, ce qui revient à écrire la condition en termes de concentration :

$$C_s = C(x = L, t > t_0) \qquad \text{avec} \qquad \frac{\partial C(L, t)}{\partial x} = 0\,.$$

La solution de l'équation (1) compte tenu de ces conditions a été donnée par Brenner (1962) ; posons :

$$\mathcal{C}_s(t) = \frac{C_s(t) - C_i}{C_e - C_i}\,; \qquad t' = \frac{v(t - t_0)}{L} \quad \text{et} \quad P_e = \frac{vL}{4\,D_H}\,:$$

$$\mathcal{C}_s(t) = \exp[P_e(2 - t')] \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_k \sin(2\,\lambda_k)}{\lambda_k^2 + P_e + P_e^2} \exp(-\,\lambda_k^2\, t'/P_e)$$

où les λ_k ($k = 1, 2, 3...$) sont les racines positives par ordre croissant de l'équation transcendante

$$\operatorname{tg} 2\,\lambda = \frac{2\,\lambda\, P_e}{\lambda^2 - P_e^2}$$

Cette solution a l'inconvénient de converger lentement ; pour $P_e = 4$, il faut déjà utiliser 12 termes dans la somme pour obtenir $\mathcal{C}_s$ avec quatre chiffres significatifs exacts.

Pour $P_e > 4$, il vaut mieux utiliser une solution asymptotique, telle que celle présentée par Brenner :

$$\mathcal{C}_s(t) = 1 - \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}[\sqrt{Pe/t'}\ (1 - t')] + [+\ 1/(1 + t')]\ \sqrt{t'/(4\,\pi\,P_e)}\ \exp[-\ P_e(1 - t')^2/t']\ \psi(\tau) \quad (4)$$

où $\tau = t'/(1 + t')$ et

$$\psi(\tau) = (1 - 6\,\tau + 4\,\tau^2) - \tau(1 - \tau)/(2\,P_e).(1 - 18\,\tau + 24\,\tau^2) + \ldots + + (-1)^k\,[\tau(1 - \tau)/(2\,P_e)]^k\,\phi_k(\tau) + \ldots$$

avec $\phi_k(\tau) = 1.\,3.\,5. \ldots (2\,k + 1)\,[1/(2\,k + 1) - 6\,\tau + 4\,(k + 1)\,\tau^2]$.

Cette expression permet de calculer en particulier la valeur $\mathcal{C}_s(t_1)$ pour laquelle $t' = 1$, pour chaque valeur de P_e. On voit ici que pour $t' = 1$, $\mathcal{C}_s(t_1)$ est toujours supérieur à 0,5. Ceci signifie donc qu'au temps t_1 où l'on a fait percoler dans la colonne un volume de solution égal au volume poral de la colonne, la concentration relative $\mathcal{C}_s(t_1)$ de l'effluent a une valeur supérieure à 0,5 et qui ne dépend que de P_e (fig. 3).

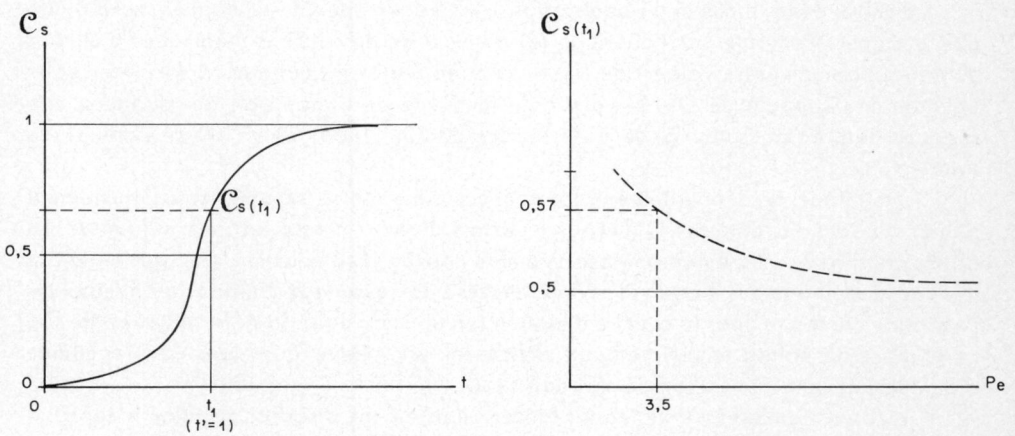


FIG. 3. — *Concentration relative de l'effluent Cs à l'instant t_1 où un volume V_p s'est écoulé dans la colonne.*

Cette remarque permet de modifier légèrement la méthode de dépouillement des courbes d'élution. Une fois déterminé α, par la méthode de Rose et Passioura puis B et P_e, on connaît par la relation $\mathcal{C}_s(t_1) = f(P_e)$ la valeur de la concentration de l'effluent à l'instant où un volume $V_p = \mathcal{U}\,\varepsilon$ de solution a traversé la colonne à partir du temps t_0. On peut donc en déduire par interpolation sur la courbe d'élution la valeur de t_1 expérimentale, d'où la valeur de la vitesse moyenne $\bar{v} = \mathcal{U}/(t_1\,S)$ où n'intervient plus la porosité ε. On peut alors calculer la valeur de $D_H = \bar{v}L/B$.

B. — *Méthode de l'impulsion*

1) *Colonne semi-infinie.*

On retrouve les conditions :

$$C(x \geqslant 0, t = t_0) = C_i$$
$$C(x \infty \ , t > t_0) = C_i$$

et à l'entrée de la colonne, on a maintenant :

$$C(x = 0, t_0 < t \leqslant t_m) = C_e$$
$$C(x = 0, t > t_m) \qquad = C_i.$$

La solution développée de l'équation (1) compte tenu de ces conditions a été donnée par Lapidus et Amundson (1952) ; nous l'écrirons sous la forme :

$$C_s(t) = G(t - t_0) - G(t - t_m) \qquad \text{pour } t > t_m \tag{5}$$

où G(z) est donné par l'équation (3) :

$$G(z) = C_i + \frac{1}{2}(C_e - C_i)\left\{ \operatorname{erfc} \frac{L - \bar{v}z}{2\sqrt{D_H z}} + \exp(\bar{v}L/D_H) \operatorname{erfc} \frac{L + \bar{v}z}{2\sqrt{D_H z}} \right\}.$$

Le choix de la durée de l'impulsion $(t_m - t_0)$ pour une vitesse donnée, sera guidé par le calcul préalable par l'équation (5) d'une série de courbes théoriques d'élution obtenues pour diverses valeurs de $(t_m - t_0)$ et de D_H ; on peut ainsi déterminer pour un domaine supputé de D_H la valeur de la durée de l'impulsion qui donnera une réponse dont l'amplitude C_M sera de l'ordre de 70p. 100 à 90 p. 100 de l'amplitude limite C_e.

La méthode de dépouillement des courbes d'élution se résume ici à l'ajustement numérique des paramètres D_H et $\bar{v}$ (et parfois de $t_m - t_0$) de façon à minimiser les écarts entre la courbe d'élution observée et la courbe $C_s(t)$ calculée. Cet ajustement se fait par la méthode des moindres carrés, et présente l'avantage d'utiliser au mieux l'information contenue dans la courbe d'élution (en utilisant pour la détermination de D_H un nombre de points expérimentaux nettement plus élevé que dans la précédente méthode utilisant un échelon de concentration).

L'inconvénient est qu'il faut, pour lancer l'ajustement, disposer de valeurs approximatives de D_H et de $\bar{v}$. Alors que $\bar{v}$ peut être estimé facilement ($\bar{v} = Q/(S\varepsilon)$), D_H devra être interpolé de mesures déjà dépouillées (soit par cette méthode soit par la précédente).

Il faut signaler aussi que cette méthode exige des calculs plus pénibles et plus longs que la précédente.

2) *Colonne finie.*

Il suffirait de prendre pour G(z) l'expression donnée pour $C_s(t)$ dans l'équation (4). Mais les calculs s'en trouveraient très alourdis, ceci sans gain appréciable sur l'estimation de D_H (les erreurs expérimentales étant supérieures à l'amélioration qui pourrait être apportée).

V. — Sensibilité de la détermination de D_H aux erreurs expérimentales

Les paramètres expérimentaux qui interviennent dans la détermination de D_H à l'aide des méthodes précédentes sont :

— la vitesse d'écoulement $\bar{v}$;
— les concentrations C_0, C_i et C_s ;
— éventuellement la durée de l'impulsion $t_m - t_0$;

Les répercutions sur D_H des erreurs de détermination expérimentale de ces paramètres peuvent être commodément étudiées par simulation. A cet effet, nous sommes partis d'une courbe d'élution « expérimentale » obtenue par calcul direct à partir des valeurs vraies de paramètres suivantes :

$$\left.\begin{aligned} D_H &= 100\,10^{-6}\ \text{cm}^2/\text{s} \\ \bar{v} &= 30\ \text{cm/h} \end{aligned}\right\} (B = 1\,667)$$

$$t_m - t_0 = 300\ \text{s (éventuellement)}\ (t'_m = 0{,}125)$$

pour la colonne étudiée ($\varepsilon = 0{,}375$).

Les concentrations de l'effluent ont été calculées pour 20 points séparés de 60 s, couvrant entièrement le pic de réponse (cas de l'impulsion), ou de 14 points séparés de 60 s, centrés sur t_1 (cas de l'échelon) ; elles constituent pour chaque méthode la « courbe d'élution vraie ».

1. — *Vérification des méthodes*

La méthode de dépouillement de l'échelon a été testée en prenant comme courbe d'élution la « courbe vraie », et pour v la valeur vraie 30 cm/h. La méthode de Rose et Passioura conduit à une erreur de — 2,9 p. 100 sur l'estimation de D_H. Cette erreur est annulée lors de l'ajustement numérique subséquent.

La méthode d'exploitation de l'impulsion à deux ou trois paramètres, utilisée en faussant de 10 p. 100 $\bar{v}$ et D_H vrais et en prenant pour $t_m - t_0$ la valeur vraie 300 s, réestime exactement les paramètres (ce qui ne constitue qu'une vérification du bon fonctionnement du programme d'ajustement).

2. — *Influence de la précision des mesures de concentration*

Les calculs ont été repris en utilisant pour valeurs estimées des paramètres les valeurs vraies ($\bar{v}$ pour la méthode de l'échelon, $\bar{v}$, D_H et $t_m - t_0$ pour les impulsions). Les courbes d'élution utilisées sont calculées à partir de la « courbe d'élution vraie » en déplaçant chaque valeur de concentration d'une même valeur relative Δ. Le tableau 1 donne les résultats pour $\Delta = \pm 5$ p. 100, ± 2 p. 100 et ± 1 p. 100. Notons que $\Delta > 0$ conduit pour la méthode de l'échelon à des valeurs de concentration supérieures à 1 ; ces valeurs ont donc dû être tronquées à 1, ce qui revient à annuler Δ dans la partie terminale de la courbe d'élution, et entraînera une sous-estimation de

TABLEAU 1

Influence de la précision des mesures de concentration

Δ p. 100	— 5 p. 100	— 2 p. 100	— 1 p. 100	0 p. 100	+ 1 p. 100	+ 2 p. 100	+ 5 p. 100
D_H (1).....	126,6	110,1	100,3	97,1	94,0	91,5	82,7
D_H (2).....	126,1	109,4	104,1	99,9	95,9	93,1	85,3
D_H (3).....	117	106	103	99,8	96,7	94,1	85,4
D_H (4).....	114	105	102	99,8	97,0	95,0	86,3
$\bar{v}$ (1).....	29,9	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,1
$\bar{v}$ (2).....	29,9	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,1
$\bar{v}$ (3).....	30,0			30,0			30,0
$\bar{v}$ (4).....	30,0			30,0			30,0
$t_m - t_0$ (4).....	289	296	298	300	302	304	309

(1) : Méthode de Rose et Passioura.
(2) : Méthode (1) + ajustement numérique de $\bar{v}$ et D_H.
(3) : Méthode de l'impulsion, ajustement de $\bar{v}$ et D_H.
(4) : Méthode (3) + ajustement numérique de t_m-t_0.
Unités employées : D_H en 10^{-6} cm^2/s ; $\bar{v}$ en cm/h ; t_m-t_0 en s.

l'influence de Δ sur l'estimation de D_H. Les paramètres $\bar{v}$, et éventuellement D_H et $t_m - t_0$, sont estimés au départ par leur valeur vraie.

On vérifie d'abord que pour Δ = 0 p. 100, les trois méthodes numériques n'introduisent pas d'erreur. Pour la méthode de Rose et Passioura on retrouve l'erreur systématique de — 2,9 p. 100 sur D_H.

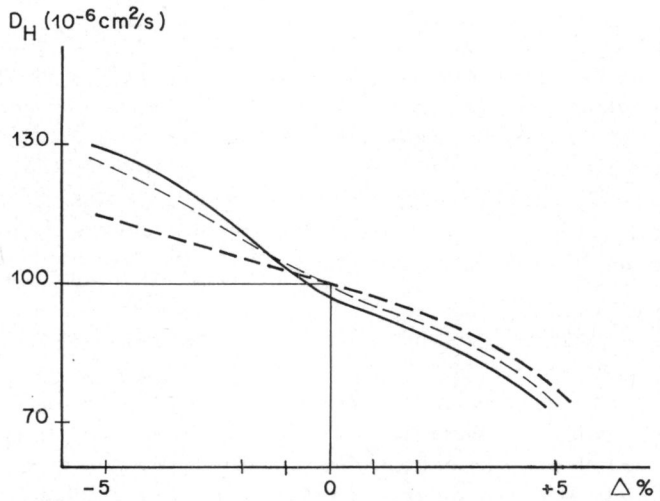


FIG. 4. — *Valeurs de D_H obtenues à partir de mesures de concentration plus ou moins erronnées.*

——— (1) : Méthode de Rose et Passioura
— — — (2) : Méthode (1) + ajustement numérique de $\bar{v}$ et D_H
— — — (4) : Méthode (3) + ajustement numérique de t_m-t_0.

D'autre part, les ajustements ne provoquent pas une dérive sensible de $\bar{v}$; pour $\Delta = \pm 5$ p. 100, on trouve seulement une erreur de $\pm$ 0,3 p. 100 sur $\bar{v}$ dans le cas de la méthode de l'échelon. Ceci montre que le paramètre $\bar{v}$ est pratiquement indépendant de D_H lors des ajustements.

Par contre, l'estimation de D_H est très sensible aux erreurs de mesure sur les concentrations. Pour Δ passant de — 5 p. 100 à + 5 p. 100, D_H varie de 43,9 p. 100 par la méthode de Rose et Passioura, écart réduit à 40,8 p. 100 par ajustement numérique (méthode de l'échelon : rappelons que l'influence de Δ sur D_H est de plus sous-estimée pour $\Delta > 0$). La méthode de l'impulsion, de par sa plus grande richesse en information, se révèle plus stable. L'ajustement de $\bar{v}$, D_H et $t_m - t_0$ conduit à une erreur sur les estimations de D_H et de $t_m - t_0$, mais D_H ne varie plus que de 27,7 p. 100 lorsque Δ passe de — 5 p. 100 à + 5 p. 100, et que de 10 p. 100 lorsque Δ passe de — 2 p. 100 à + 2 p. 100 (fig. 4).

De toute façon, une erreur systématique sur les mesures de concentration de l'effluent aura de graves conséquences sur la détermination de D_H.

3. — *Estimation de* $\bar{v}$

Les quatre méthodes décrites ont été appliquées pour des valeurs de $\bar{v}$ décalées de $\pm$ 5 p. 100, $\pm$ 2 p. 100 et $\pm$ 1 p. 100 par rapport à 30 cm/h, et avec la « courbe d'élution vraie ». Les résultats, non détaillés ici, montrent que $\bar{v}$ est correctement réestimé (à moins de 0,3 p. 100 près pour $\pm$ 5 p. 100 au départ) par les quatre méthodes. Des erreurs sur la mesure de $\bar{v}$ n'ont donc pas d'influence sur la détermination de D_H.

Mais $\bar{v}$ ne signifie pas valeur moyenne de la vitesse au cours de l'expérience (mais valeur moyenne dans les pores de la colonne) : $\bar{v}$ doit rester constant tout au long de l'expérience. Toute variation de $\bar{v}$ fausse l'allure de la courbe d'élution (tout autrement que par une homothétie parallèle à l'axe des temps), et fait varier corrélativement D_H ; il s'agit même là, sans qu'il soit aisément quantifiable, d'un effet très nuisible (d'après certains résultats expérimentaux que nous avons obtenus).

4. — *Estimation de la durée de l'impulsion.*

Une étude similaire montre qu'une imprécision de $\pm$ 5 p. 100 sur la mesure de $t_m - t_0$ n'a aucune influence sur la détermination de D_H (ceci bien sûr dans le seul cas de la méthode de l'impulsion, et quand le paramètre $t_m - t_0$ est ajusté).

VI. — Comparaison des résultats expérimentaux

Sur une même colonne (diamètre 60 millimètres, L = 200 millimètres), préparée avec des billes de verre de diamètre compris entre 180 et 200 microns, des expériences successives de déplacement ont été réalisées avec une alimentation soit du type échelon de concentration, soit du type impulsion, avec différents débits.

Les courbes d'élution ont été traitées suivant les cas soit par la méthode de l'échelon (colonne de longueur finie), soit par celle de l'impulsion (colonne semi-infinie).

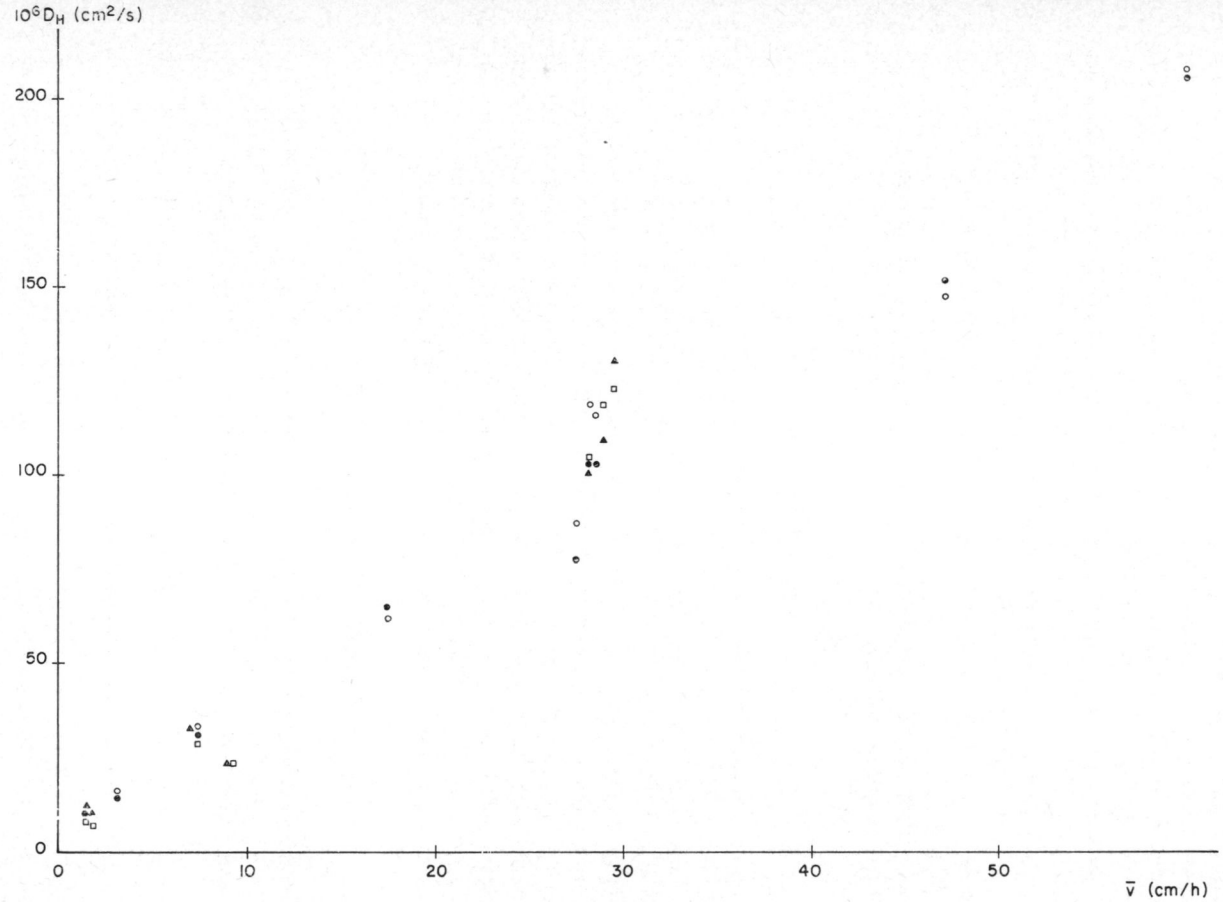


FIG. 5. — *Relation entre le coefficient de dispersion hydrodynamique et la vitesse d'écoulement pour les différentes méthodes utilisées.*

Echelons { ● Rose et Passioura ; ○ Ajustement numérique } Impulsions { ▲ Ajustement 2 paramètres ; □ Ajustement 3 paramètres }

Les mesures ont été faites pour différentes vitesses (entre 1,5 et 60 centimètres/heure). La méthode de l'impulsion n'a été appliquée que jusqu'à 30 centimètres/heure, la durée de l'impulsion devenant trop courte à des vitesses supérieures.

Le traceur utilisé a été l'atrazine (2 chloro-4 éthylamino-6 isopropylamino-s-triazine), pour lequel $D_0 = 6\ 10^{-6}$ centimètres carrés/seconde.

Sur la figure 5 sont reportés les résultats obtenus :

— avec la méthode de l'échelon par application de la méthode de Rose et Passioura (automatisée), et par ajustement numérique ;

— avec la méthode de l'impulsion par ajustement numérique portant sur deux paramètres (D_H et $\bar{v}$), et sur trois paramètres (durée de l'impulsion en plus).

En ce qui concerne les échelons de concentration, on voit que la méthode de Rose et Passioura donne par elle-même de bons résultats, et que l'ajustement numérique ultérieur n'apporte rien de plus apparemment.

Pour les impulsions, l'ajustement de 3 paramètres au lieu de 2 ne se justifie qu'aux vitesses les plus élevées ; car c'est alors que la durée de l'impulsion est le plus difficile à mesurer (la durée des purges de l'espace mort d'alimentation de la colonne n'étant plus négligeable).

Dans l'ensemble, les 2 méthodes donnent des résultats concordants. Des répétitions de l'expérience pour des vitesses de l'ordre de 30 centimètres/heure (c'est-à-dire dans des conditions difficiles) montrent une dispersion des résultats de 16 p. 100 pour les impulsions et de 32 p. 100 pour les échelons.

Notons que dans une représentation graphique du type $\log(D_H/D_0)$ en fonction de $\log(\bar{v}d/D_0)$, très fréquemment utilisée, les écarts paraîtraient beaucoup moins importants ; une telle représentation, qui ne se justifie que lorsque le domaine d'étude est très étendu (D_H/D_0 et $\bar{v}d/D_0$ variant de plusieurs ordres de grandeur), masque en effet les erreurs expérimentales de détermination des paramètres impliqués.

La comparaison de ces résultats avec ceux donnés par la simulation permet d'approfondir l'analyse des erreurs expérimentales. La détermination des concentrations est faite pour l'atrazine avec une erreur maximale de $\pm$ 2 p. 100. De telles erreurs, pour des expériences où la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 30 centimètres/heure, ne semblent pas, d'après la simulation, pouvoir expliquer une dispersion sur la détermination de D_H de plus de 18 p. 100 (échelons) ou de 10 p. 100 (impulsions). Les dispersions observées (respectivement 32 p. 100 et 16 p. 100), montrent que d'autres sources d'erreur doivent donc être prises en considération.

Des variations du milieu poreux lui-même pourraient être invoquées. Mais nous n'avons constaté entre le début et la fin des expériences aucun tassement appréciable des billes de verre dans la colonne, qui aurait accompagné la modification d'une caractéristique géométrique du milieu poreux (porosité par exemple).

Par contre, nous avons fait l'hypothèse que D_H restait constant tout au long d'une expérience donnée, ce qui implique que v le soit resté aussi. Or diverses causes pourraient induire des variations de la vitesse $\bar{v}$, par exemple les variations :

— de température (donc de viscosité de l'eau) ;

— de vitesse de rotation de la pompe ;

— des propriétés élastiques des tuyaux de liaison ;

— de la charge hydraulique en amont de la pompe.

Étant donné que la température varie au maximum de 2 °C en cours d'expérience, il est possible de négliger ses effets. Mais les 3 autres causes de variation, que nous n'avons pas étudiées systématiquement, peuvent intervenir ; notons d'ailleurs que nous avons pu observer de petites variations dans le débit au cours des expériences, dues surtout à la nature péristaltique de la pompe utilisée.

Il faut souligner que les dispersions de résultats trouvées peuvent être considérées comme des maxima. Il n'est pas possible cependant de les comparer avec celles d'autres résultats publiés. En effet, parmi les très nombreux travaux publiés sur la dispersion hydrodynamique, très peu font état de valeurs mesurées de D_H, et aucun, à notre connaissance, ne propose une analyse et une estimation des erreurs commises lors de la détermination des D_H.

Notons enfin que les dispersions de résultats dont il a été question jusqu'ici portent sur des mesures faites sur une seule colonne ; la mesure de D_H pour un milieu donné implique de plus une répétition des mesures pour différentes colonnes préparées avec le même milieu, ce qui conduit à un autre type de dispersion des résultats, plus purement statistique.

VII. — Conclusions

Les résultats précédents montrent que, même avec un milieu poreux des plus simples, saturé, et avec des conditions expérimentales de laboratoire, la mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique n'est pas facile. Il s'agit pourtant de l'un des paramètres essentiels de l'écoulement des solutions dans les sols, et c'est pourquoi sa connaissance est si souvent nécessaire ; il faut donc s'attacher à le déterminer avec le maximum de rigueur.

Au niveau méthodologique, nous rappellerons simplement que :

— les méthodes du créneau de concentration et de l'impulsion donnent des résultats comparables, et qu'elles demandent une attention particulière en ce qui concerne la qualité des mesures de concentration et la stabilité de la vitesse d'écoulement ;

— la méthode de l'impulsion présente le plus d'avantages (plus grande précision, moins grande sensibilité aux erreurs expérimentales, plus grand nombre de points expérimentaux utilisés ; enfin commodité des manipulations, la colonne étant immédiatement réutilisable en fin d'expérience) ;

— la méthode de Rose et Passioura appliquée aux échelons de concentration présente par contre l'avantage de pouvoir être exploitée graphiquement.

En ce qui concerne l'utilisation de ces méthodes, nous constatons enfin que, lors d'une étude des variations de D_H dans différentes conditions, il est prudent, en l'absence d'un nombre suffisant de répétitions, de ne prendre en considération que des différences supérieures à 30 p. 100 ; le peu de signification de différences plus faibles pourrait conduire en effet à de fausses interprétations.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Measurement of the longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient in a saturated porous medium

After defining parameters typical of hydrodynamic dispersion, two methods for measuring the hydrodynamic dispersion coefficient are described : the « step » method and the « impulse » method. Some methods for handling the results are presented (a graphical method and several numerical fittings). Examples are given in the case of a solution of atrazine and of a porous medium containing glass beads. It appears that the two main methods described give comparable results and that the accuracy of measurement improves as the flow rate diminishes.

Zusammenfassung

Messung des hydrodynamischen Längsdispersionskoeffizienten in einer gesättigten porösen Umgebung

Nachdem die für die hydrodynamische Dispersion charakteristischen Parameter erklärt wurden, zwei Methoden für die Messung des hydrodynamischen Dispersionskoeffizienten beschrieben wenden : die Methode des Konzentrationsgrads und die Methode des Antriebs Mehrere Möglichkeiten für die Auswentung der Ergebnisse (graphische Darstellung, numerische Abstimmung) sind vorgestellt. Beispiele für eine Atrazinlösung und eine aus Glaskugeln bestehende Umgebung sind gegeben. Es zeigt sich, dass die zwei beschriebenen Hauptmethoden vergleichbare Ergebnisse liefern und dass die Messungsgenauigkeit um so besser ist als die Abflussgeschwindigkeit geringer ist.

РЕЗЮМЕ

Измерение коэффициента продольной дисперсии в насыщенной пористой среде.

Ж. ЛЕ РЕНАР, Р. КАЛЬВЕ, К. ТУРНЬЕ, А. ХЮБЕР.

Определив параметры характеризующие гидродинамическую дисперсию, авторы описывают два метода измерения ее коэффициента : метод уровней концентрации и метод импульсов. В работе фигурируют также несколько способов разработки результатов (графическая разработка, цифровое урегулирование). Приводятся также и примеры для случая раствора атразина и пористой среды состоящей из стеклянных шариков. И, оказывается, что два главные описанные метода дают сходные результаты, и что точность измерений тем более велика, чем медленнее происходит вытекание.

Références bibliographiques

ARIS R., 1956. On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube. *Proc. Roy. Soc.*, London, A 235, 67-77.

BEAR J., 1969. *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier Publishing Company, New York, London.

BRENNER H., 1962. The diffusion model of longitudinal mixing in beds on finite lenght. Numerical values. *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 229-243.

CALVET R., GRAFFIN Ph. 1974. Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. agron.*, **25** (2-3), 123-155.

FRIED J. J., COMBARNOUS M. A., 1971. Dispersion in porous media. *Adv. Hydroscience*, **7**, 169-282.

LAPIDUS L., AMUNDSON N. R., 1952. Mathematics of adsorption in beds. VI : The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns. *J. Phys. Chem.*, **56**, 984-988.

LINDSTROM F. T. *et al.* 1967. Theory on the movement of some herbicides in soils. Linear diffusion and convection of chemicals in soils. *Environ. Sci. Techn.* **1** (7), 561-565.

ROSE D. A., 1973. Some aspects of the hydrodynamic dispersion of solutes in porous materials. *J. Soil Sci.*, **24** (3), 284-294.

ROSE D. A., PASSIOURA J. B., 1971. The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. *Soil Sci.*, **111** (4), 252-257.

De WIEST J. M., 1969. *Flow through porous media*. Academic Press New York London.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 65-73.

Analyse numérique des expériences de lixiviation en sol homogène

H. LAUDELOUT, J. E. DUFEY *

Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Louvain, Place Croix du Sud, 2, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique)

Résumé

On décrit une méthode numérique permettant d'ajuster aux données expérimentales de lixiviation une courbe théorique décrivant la variation de concentration dans l'effluent d'une colonne de sol homogène traversée par une solution de substance non réactionnelle dans le milieu.

Le programme de calcul ajuste deux paramètres : le volume des pores du sol accessible au soluté et le coefficient de dispersion propre au système poreux ; il calcule ensuite la courbe théorique correspondant aux deux paramètres trouvés.

Introduction

Les problèmes d'utilisation des engrais minéraux, de pollution des nappes d'eau souterraines, d'épuration des effluents d'élevage comportent invariablement l'étude du transport convectif de solutés dans un milieu poreux. Un mémoire récent de Calvet et Graffin (1974) a fait le point des méthodes utilisées pour la description mathématique de ces processus. Ces auteurs se sont limités à une discussion des conséquences mathématiques du choix des divers modèles décrivant quantitativement les processus sans s'étendre sur les techniques d'analyse des résultats expérimentaux portant sur le mouvement des solutés à travers les sols.

Le but de cette note est de montrer comment un ensemble de résultats expérimentaux relatifs au transport convectif, en régime permanent, d'un soluté non réactionnel à travers un sol permet d'extraire, par une technique numérique générale, 2 paramètres caractéristiques du sol étudié. Ces paramètres représentent une évaluation quantitative de la tortuosité et, par conséquent, de l'architecture du système poreux, ainsi que de la fraction du volume poreux total qui est accessible au soluté. En d'autres termes, on estime quantitativement la difficulté de lessivage d'un soluté donné, causée tant par le degré de mélange des solutions déplacée et déplaçante que par le volume de solution du sol à déplacer.

(*) Aspirant au Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S., Belgique).

Principe du calcul

Nous nous limiterons à un rappel très bref des aspects mathématiques du transport convectif dans un milieu poreux puisque ceux-ci ont été traités en détail dans l'article cité de Calvet et Graffin. L'équation aux dérivés partielles

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \qquad (1)$$

décrit le mouvement d'un soluté à une concentration c dans un liquide, se déplaçant dans les pores à une vitesse moyenne $v = V/\Phi$, où V est la vitesse d'infiltration et Φ la porosité accessible au soluté ; x et t sont les coordonnées d'espace et de temps ; D est un coefficient qui traduit la somme des effets de diffusion et de dispersion hydrodynamique.

Les conditions initiales et aux limites auxquelles doit satisfaire la solution de cette équation en milieu de géométrie finie sont :

$$vc_0 = vc - D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad x = 0 \qquad t > 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0 \qquad , x = L \qquad t > 0$$

$$c(x, 0) = c_i \qquad \text{pour } 0 < x < L, \qquad t = 0$$

où c_0 est la concentration du soluté dans la solution qui alimente une colonne de longueur L dans laquelle la concentration initiale du soluté était c_i. Une discussion approfondie de ces conditions, et plus spécialement de la seconde, peut être trouvée dans l'article de Pearson (1959).

Il est commode d'utiliser les 3 variables réduites, C, X, et N définies par :

$$C = \frac{c - c_0}{c_i - c_0} ; \qquad X = \frac{x}{L} ; \qquad N = \frac{vt}{L} ;$$

N représente le nombre de fois que le volume poreux effectif de la colonne a été renouvelé après t secondes, c'est-à-dire le rapport entre le volume de solution récoltée à la base de la colonne au temps t et le volume poreux.

On définit en outre un nombre

$$P = \frac{vL}{4D}$$

souvent connu sous le nom de « nombre de Péclet ». L'équation aux dérivés partielles devient alors :

$$\frac{\partial C}{\partial N} + \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{4P} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} .$$

Les conditions initiales et aux limites peuvent également s'exprimer en fonction de ces nouvelles variables sans dimensions.

Brenner (1962) a présenté une solution analytique de l'équation ci-dessus satisfaisant aux conditions énoncées. Il est par ailleurs aisé de trouver des solutions analytiques beaucoup plus simples que celle de Brenner. Elles n'ont pas la même généralité bien qu'elles soient suffisamment précises pour certaines valeurs assez élevées du nombre de Péclet, lesquelles ne correspondent guère aux conditions trouvées le plus fréquemment dans l'expérimentation sur les sols.

La solution analytique de Brenner, donnant $C_e = C(L, N)$: la concentration relative de l'effluent, ne peut être utilisée efficacement que si le nombre de Péclet est inférieur à 5 environ, et sa convergence est d'autant plus lente que le temps réduit N est court. La raison en est que cette solution est constituée d'une série alternée de nombres dont la somme algébrique doit être comprise entre 0 et 1. Or, l'ordre de grandeur des premiers de ces nombres devient rapidement très élevé quand P augmente (10^6 pour $P = 10$ et $N = 0.2$, par exemple). Dès lors, le calcul précis de la valeur de la série suppose un nombre prohibitif de décimales.

Brenner a d'autre part dérivé une solution asymptotique dont la convergence est d'autant plus rapide que P est élevé. Toutefois cette convergence est encore très satisfaisante lorsque P prend des valeurs très faibles, voisines de l'unité. La solution asymptotique convient donc parfaitement à l'étude de la presque totalité des cas pratiques d'écoulement de solutés en milieu poreux et nous l'avons utilisée systématiquement.

Les 2 seuls paramètres de l'équation de Brenner qui ne sont pas directement accessibles à l'expérience sont le nombre de Péclet et le volume poreux effectif de la colonne. Ces 2 paramètres doivent être extraits d'une série de valeurs expérimentales reliant la concentration de l'effluent au volume total percolé. Le volume poreux rapporté au volume total de la colonne en donnera évidemment la porosité effective, qui, elle-même, permettra un calcul direct du coefficient de dispersion à partir du nombre de Péclet et des conditions expérimentales d'écoulement (vitesse d'infiltration et longueur de la colonne). La condition essentielle pour qu'une analyse de ce type puisse se faire est évidemment la possibilité d'un ajustement suffisamment exact d'une courbe théorique aux valeurs expérimentales.

Technique du calcul

Un programme de calcul basé sur la méthode des moindres carrés permet de trouver le couple de valeurs pour le nombre de Péclet (P) et le volume poreux (U) qui assure le meilleur ajustement de la courbe théorique aux données expérimentales.

Il s'agit donc de trouver les valeurs P et U qui minimisent la somme

$$S = \sum \{ C'_e - C''_e \}^2$$

où la sommation se fait pour toutes les valeurs expérimentales de la concentration de l'effluent C''_e, C'_e étant la valeur calculée pour un volume total d'effluent égal à celui auquel correspond la concentration C''_e. La valeur théorique calculée dépendra évidemment du choix qui aura été fait des 2 paramètres à introduire dans la solution analytique.

Par conséquent, la somme des écarts quadratiques sera minimale lorsque le couple des valeurs annulera simultanément les dérivées partielles de S par rapport à l'une et l'autre de ces valeurs, soit :

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial S}{\partial U} = 2\,\Sigma(C'_e - C''_e)\,\frac{\partial C'_e}{\partial U} \qquad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial S}{\partial P} = 2\,\Sigma(C'_e - C''_e)\,\frac{\partial C'_e}{\partial P}\,.$$

Le programme de calcul consiste à établir les 2 courbes décrivant le lieu des points (U, P) pour lesquels $\varepsilon_1 = 0$ et, de même, le lieu des points pour lesquels $\varepsilon_2 = 0$; les coordonnées de l'intersection des 2 courbes donnent le couple cherché.

Ce programme a été écrit en Fortran IV (*). Les données d'entrée indispensables sont les couples expérimentaux : volume total de l'effluent, concentration relative au temps t ainsi qu'une estimation très approximative du volume poreux et du nombre de Péclet.

Une estimation de précision largement suffisante du volume poreux est donnée par la valeur du volume de l'effluent pour laquelle $C_e = 0{,}5$. De même pour le nombre de Péclet, on a $P = \pi s^2$ où s est la pente de la tangente à la courbe d'élution au point $C_e = 0{,}5$. Ces 2 estimations sont basées sur la solution de l'équation (1) pour une géométrie semi-infinie.

Très succinctement et sans entrer dans les détails d'orientation du programme de calcul, la méthode de recherche de la paire optimale (P, U) peut être schématisée de la façon suivante : le programme centre les valeurs estimées dans un intervalle qui est subdivisé en 10 incréments ΔU et ΔP. Le calcul s'effectue d'abord sur les 10 valeurs de P et la première valeur de U, chacun des 10 couples P_i, U_1 permet le calcul des quantités ε_1 et ε_2 définies par les équations (2) jusqu'au moment où ces quantités changent de signe. A ce moment, le programme calcule par interpolation linéaire, les valeurs de P correspondant à $\varepsilon_1 = 0$ et à $\varepsilon_2 = 0$ (fig. 1 et 2). La différence Δ_1 est alors évaluée :

$$\Delta_1 = \{\, P_{\varepsilon_1=0} - P_{\varepsilon_2=0} \,\}_{U_1}$$

soit la différence des valeurs de P correspondant aux 0 des 2 dérivées partielles des sommes des écarts quadratiques.

Un calcul identique est recommencé avec la seconde valeur de U et les 10 valeurs de l'intervalle de P ; de la même façon que ci-dessus, on évalue une nouvelle différence Δ_2

$$\Delta_2 = \{\, P_{\varepsilon_1=0} - P_{\varepsilon_2=0} \,\}_{U_2}$$

laquelle est comparée à Δ_1. Si ces 2 différences sont de même signe et si $|\,\Delta_2\,| > |\,\Delta_1\,|$, cela signifie que l'on s'éloigne des valeurs du couple optimal et le programme choisit d'autres intervalles de P et U. Si l'on a $|\,\Delta_2\,| < |\,\Delta_1\,|$, le calcul continue avec la 3e valeur

(*) Une version de ce programme ainsi qu'un exemple des sorties de calcul peuvent être obtenus chez les auteurs.

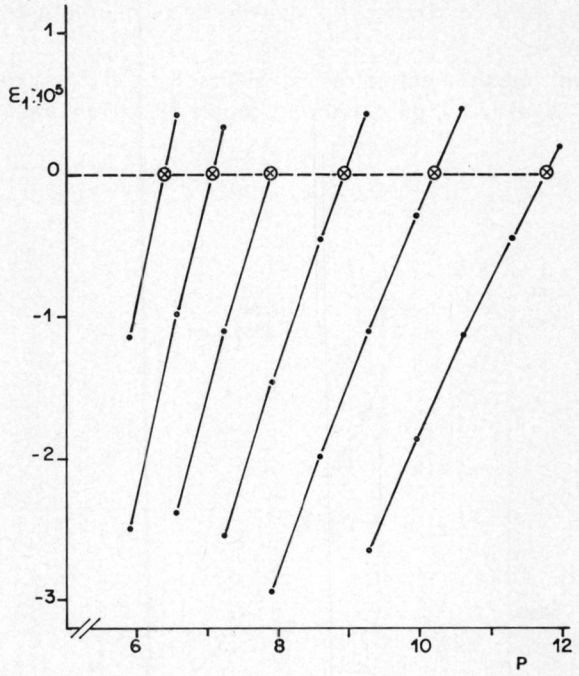


FIG. 1. — *Exemple d'interpolation* (⊗) *de* $P_{\varepsilon_1=0}$ *pour des valeurs de volume poreux* U_1, U_2, ... U_6 (*de droite à gauche*).

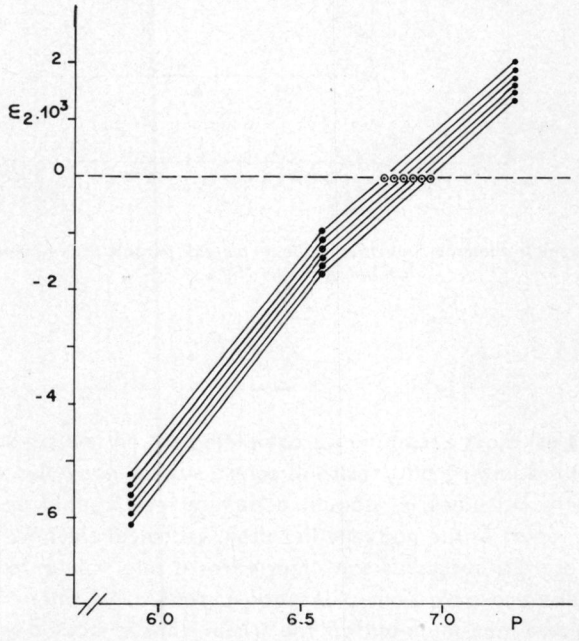


FIG. 2. — *Exemple d'interpolation* (⊙) *de* $P_{\varepsilon_2=0}$ *pour les valeurs de volume poreux* U_1, U_2, ... U_6 (*de droite à gauche*).

de U ; on obtient une 3e différence Δ_3, laquelle est comparée à Δ_2 et ainsi de suite jusqu'à ce que $\Delta_n . \Delta_{n-1} < 0$.

En interpolant linéairement entre les valeurs $P_{\varepsilon_1=0}$ et $P_{\varepsilon_2=0}$ correspondant aux volumes poreux U_n et U_{n-1}, on obtient un couple (P, U) qui annule simultanément ε_1 et ε_2 (fig. 3).

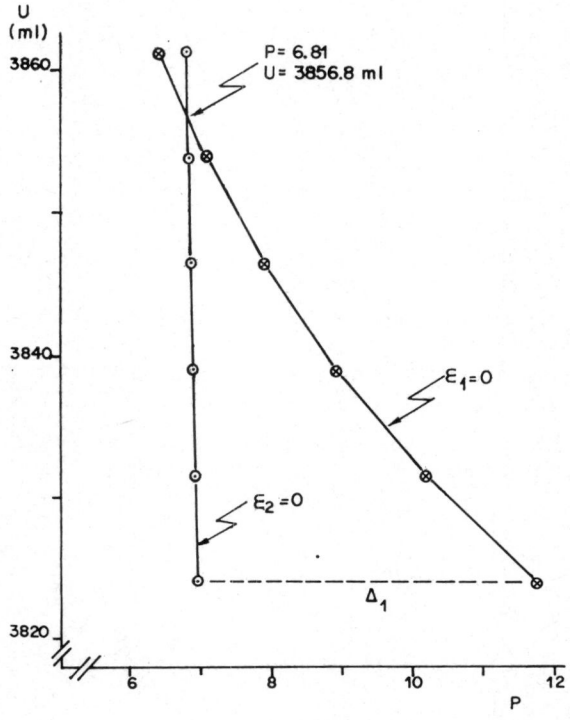


FIG. 3. — *Exemple d'interpolation de la meilleure paire de paramètres « volume poreux (U), nombre de Péclet (P) ».*

Le processus est alors recommencé complètement en choisissant des incréments plus petits dans un domaine plus restreint centré sur les nouvelles valeurs de P et U qui viennent d'être calculées, et aboutit à un nouveau couple de valeurs, laquelle sert de point de départ à une nouvelle itération. Le calcul s'achève lorsque les différences entre 2 résultats successifs sont inférieures à une valeur fixée à l'avance ou bien lorsque le nombre maximum d'itération permis a été atteint. Il est nécessaire de se fixer ce nombre maximum puisqu'une erreur dans le mode d'entrée des données ou un choix des valeurs initiales s'écartant trop de la réalité peut causer une consommation exagérée de temps de calcul.

Validation du programme

La première validation à laquelle un programme de ce type doit être soumis consiste évidemment à recalculer à partir d'une courbe d'élution théorique les valeurs de la porosité et du nombre de Péclet utilisées dans la solution analytique.

La précision obtenue est très satisfaisante (0,03 p. 100) l'erreur relative provenant essentiellement de ce que les concentrations théoriques sont introduites dans le programme de calcul avec un nombre fini de décimales.

On a également appliqué ce programme de calcul à l'analyse de nombreuses courbes d'élution de $^{36}Cl^-$ et de ^3H_2O dans des milieux poreux très divers, allant des billes de verre à un sol très argileux ; les longueurs des colonnes variaient de 10 à 100 centimètres et leurs diamètres intérieurs de 3 à 12 centimètres ; les vitesses de percolation allaient de 1 à 3 500 centimètres par jour. Cette grande diversité de conditions expérimentales a mis en évidence l'efficacité du programme pour des nombres de Péclet variant de 1,9 à 200. En outre, le temps de calcul reste compris dans des limites très raisonnables, soit de l'ordre de la dizaine de secondes de CPU sur ordinateur IBM 380-128 pour l'analyse d'une expérience comprenant quelques dizaines de points expérimentaux, l'analyse étant suivie d'un calcul de la courbe théorique.

La figure 4 montre l'excellent accord qui peut être obtenu entre des données expérimentales et la solution analytique calculée par le programme après estimation des valeurs du volume poreux et du nombre de Péclet faite à partir de ces données.

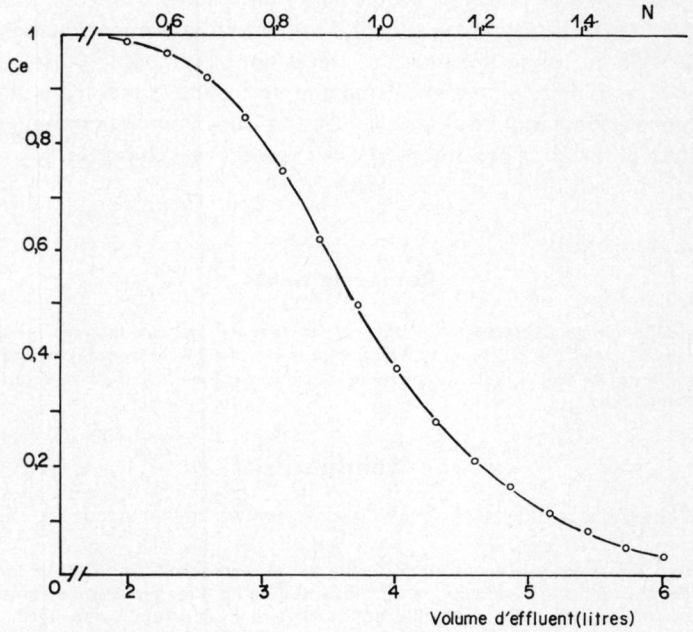


FIG. 4. — *Exemple de courbe d'effluent d'eau tritiée ; o, points expérimentaux ; ——, courbe optimum calculée par le programme.*

Conclusion

La détermination du nombre de Péclet et de la porosité d'un sol est une démarche préliminaire indispensable à toute étude sur l'entraînement d'un soluté quelconque par lessivage. Une technique numérique sûre et rapide est par conséquent absolument nécessaire. Celle que nous proposons est plus rapide et plus sûre que ce qui avait été utilisé antérieurement (Rose et Passioura, 1971) et beaucoup moins coûteuse en temps de calcul que des méthodes de simulation comme celles qui ont été utilisées par Frissel, Poelstra et Reiniger (1970).

La nécessité de la constance de la vitesse d'infiltration ne limite pas l'applicabilité de la méthode à l'écoulement en milieu saturé, mais au régime permanent avec teneur en eau uniforme dans la colonne. En milieu non saturé, la fraction volumique occupée par l'air sera considérée comme porosité non accessible au soluté, au même titre que la fraction volumique de la phase solide.

La figure 4 donne un exemple de ce type d'écoulement ; il s'agit d'une percolation d'eau tritiée à travers une colonne de sol limoneux intact de 92 centimètres de longueur et de 12 centimètres de diamètre. La vitesse d'infiltration était de 1,26 centimètre par jour et l'effluent était récolté journellement et analysé ; les données expérimentales ont permis le calcul d'un volume poreux de 3 857 millilitres et d'un nombre de Péclet de 6,79, soit une porosité effective de 0,369 et un coefficient de dispersion égal à 13,4 centimètres carré/seconde. L'analyse gravimétrique de la teneur en eau de la colonne a donné une valeur moyenne d'environ 350 grammes d'eau par décimètre cube de sol ; cet accord justifie l'application du programme décrit ci-dessus à l'analyse des courbes d'effluent d'espèces non réactionnelles en milieu non saturé mais en régime d'écoulement stationnaire.

La possibilité qu'offre le programme d'une estimation expérimentale du volume poreux accessible au soluté présente un intérêt non négligeable puisque, en solution diluée, l'existence d'un volume d'exclusion des électrolytes conduira à une diminution du volume poreux accessible aux anions. Ce fait aura comme conséquence pratique une élimination plus rapide des anions que des espèces non chargées.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Remerciements

Le programme numérique faisant l'objet de cet article a été testé sur diverses expériences de percolation réalisées par MM. J. P. Rolland, N. N. Djembi Mwemba et A. Moreale (Université de Louvain, Département Science du Sol). Qu'ils soient remerciés d'avoir bien voulu nous communiquer leurs résultats expérimentaux.

Summary

Numerical analysis of leaching experiments in homogeneous soil

A numerical method allowing to adapt to the experimental leaching data a theoretical curve representing the concentration variation in the effluent of an homogeneous soil column which is gone through by a solution of a substance which is not reactive in the medium is described.

The calculation program adjusts two parameters : the volume of the soil pores open to the aqueous solution and the dispersion factor peculiar to the porous system ; the theoretical curve corresponding to the two parameters obtained is then calculated.

Zusammenfassung

Numerische Analyse der Auslaugungsversuche in gleichmässigem Boden

Eine numerische Methode ist beschrieben, die es erlaubt, zu den experimentellen Daten der Auslaugung eine Kurve anzupassen, welche die Konzentrationsänderung in der ausströmenden Substanz einer gleichmässigen Bodensaüle darstellt, die von einer Lösung einer im Medium nicht reagierende Substanz durchgequert ist.

Das Rechenprogramm berichtigt zwei Parameter : das Volumen der lösungzugänglichen Bodenporen und den für das poröse System charakteristischen Dispersionsfaktor ; anschliessend wind die theoretische den zwei gefundenen Parametern entsprechende Kurve ausgerechnet.

РЕЗЮМЕ

Цифровой анализ опытов вымывания в гомогенной почве.

Г. ЛОДЕЛУ, Ж. Е. ДЮФЕЙ.

Описывается цифровой метод, позволяющий согласовать теоритическую кривую, выражающую изменения концентрации выделений из колонки гомогенной почвы, через которую пропускался раствор вещества не реагировавшего со средой.

В программу рассчета входят два параметра : об' ем пор почвы доступный раствору солей и коэффициент дисперсии свойственный пористой системе; затем рассчитывается теоритическая кривая соответсвующая найденным параметрам.

Références bibliographiques

BRENNER H., 1962. The diffusion model of longitudinal mixing in beds of finite length. Numerical values. *Chem. Eng. Sci.*, **17,** 229-243.

CALVET R., GRAFFIN Ph., 1974. Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. agron.*, **25** (2-3), 123-155.

FRISSEL M. J., POELSTRA P., REINIGER P., 1970. Chromatographic transport through soils. III. Assimilation model for the evaluation of the apparent diffusion coefficient in undisturbed soils with tritiated water. *Plant and Soil*, **33,** 161-176.

PEARSON J. R. A., 1959. A note on the « Danckwerts » boundary conditions for continuous flow reactors. *Chem. Eng. Sci.*, **10,** 281-284.

ROSE D. A., PASSIOURA J. B., 1971. The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. *Soil Sci.*, **111,** 253-257.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 75-93.

Étude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine (1)

I. — Effets des brise-vent sur la croissance et le développement d'une culture type : la vigne

J. C. SIMON

Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A., 84140 Montfavet

Résumé

Cette étude a permis de généraliser une méthodologie d'étude des effets biologiques des brise-vent au cas particulier de la vigne et de préciser les incidences des brise-vent naturels sur cette culture sous le climat de type aride excessif du Centre-Ouest de l'Argentine. Ces effets sont de nature comparable à ceux observés en zone tempérée (particulièrement en Bretagne). Sont mis en évidence, une augmentation de la précocité (floraison, nouaison, véraison et maturité) et un accroissement de la production près des brise-vent. L'intensité de ce dernier phénomène semble s'expliquer par le fait que les brise-vent jouent ici pleinement leur double rôle : protection des vents de régime général et protection des vents accidentels et violents (ici le vent Zonda).

Selon l'intensité du vent, les brise-vent peuvent jouer 2 rôles différents :

Lorsque le vent est très violent, leur rôle essentiel est la protection mécanique des cultures grâce à la réduction de vitesse qu'ils occasionnent (Caborn, 1957 ; Nageli, 1965 ; Van Eimern, 1964 ; Guyot, 1972).

Lorsque les vents sont plus modérés, le rôle prépondérant des brise-vent est alors de modifier les divers facteurs microclimatiques dans leur voisinage (Guyot *et al.*, 1976) créant généralement des conditions plus favorables à la croissance et au développement des végétaux (Bates, 1944 ; Staple et Lehane, 1955 ; Delecolle et Simon, 1974).

Ces 2 types d'effets, assez bien connus sous le climat tempéré de l'Europe Occidentale, ont pu être étudiés sous le climat continental aride que l'on rencontre au Centre-Ouest de la République Argentine, dans la Province de Mendoza. Cette partie de l'Argentine est une zone aride parsemée de périmètres irrigués où sont cultivés vignes et arbres fruitiers. La production agricole y est très importante : la Province de Mendoza

(1) Travail réalisé dans le cadre de la Coopération Technique à la Station d'Agrométéorologie de l'I.N.T.A. (Instituto Nacional de Technologia Agropecuaria) à San Rafael, Argentine.

occupe le 1er rang au niveau national pour la production viticole (avec plus de 50 p.100 de la production) et une des premières places pour la production fruitière.

Le dispositif expérimental a été conçu pour mettre en évidence les effets des brise-vent dans le cas de vents modérés. Néanmoins, au cours de la campagne de mesure, le ZONDA (type même du vent accidentel et violent) a soufflé une fois. Aussi, le double rôle des brise-vent sera-t-il analysé.

Dans un 1er temps, nous examinerons les caractéristiques générales du climat de la Région de San Rafael ; ce climat, de type aride excessif, rend les conditions de vie des végétaux difficiles.

Dans un 2e temps, nous analyserons les incidences des brise-vent sur la croissance et le développement d'une culture type : la vigne.

I. — Caractéristiques climatiques de la région de San Rafael et incidences agronomiques (1)

Située par 35° de latitude Sud, la Région de San Rafael est coupée des influences maritimes du Pacifique par la Cordillère des Andes et de l'Atlantique, par une grande distance. Le climat de cette région se caractérise par :

Une durée d'insolation très importante : elle est voisine de 3 050 heures par an. La fraction d'insolation est élevée (70 p. 100, sauf aux mois de mai et juin où elle est voisine de 60 p. 100).

De grandes amplitudes thermiques :

— amplitude thermique annuelle : 15,7 °C,

— amplitude thermique maximale mensuelle moyenne : 30,2 °C,

— amplitudes thermiques quotidiennes très importantes pouvant atteindre 35 °C.

Il est intéressant de noter que les amplitudes thermiques quotidiennes maximales sont relevées au printemps. Les plantes activées par les températures diurnes de l'ordre de 25 °C, sont soumises ensuite aux gelées nocturnes, d'où l'importance des dégâts dus au gel.

— *Un nombre important de jours de gelées* (en moyenne 60 jours par an, dont une quinzaine de fortes gelées ($T_{min} < -5$ °C). Les gelées d'août et septembre (2) sont particulièrement préjudiciables aux cultures, la plupart des espèces fruitières fleurissant à cette époque.

— *Une humidité de l'air faible*. Ceci traduit parfaitement l'aridité du climat. Les amplitudes de variation de l'humidité relative sont très grandes, phénomènes à relier aux grandes amplitudes thermiques. Les valeurs de H. R. peuvent descendre à moins

(1) Cette partie est une synthèse de la présentation climatique développée dans le rapport scientifique publié par la Station de Bioclimatologie d'Avignon (Simon, 1976). Les données qui y sont présentées ont été recueillies par Arnal G., de la Station Météorologique de l'I.N.T.A. à Rama Caida (San Rafael).

(2) C'est-à-dire au printemps, puisque l'on se trouve dans l'hémisphère Sud.

de 10 p. 100 quand souffle le vent Zonda. Il est à noter que la faiblesse de l'humidité relative explique le faible développement des maladies cryptogamiques, d'où la quasi-absence de traitements phytosanitaires.

— *Des précipitations en moyenne très faibles* (300 millimètres/an). Elles sont irrégulières d'une année à l'autre. Leur répartition annuelle est typique d'un climat continental avec un maximum en été et un minimum en hiver. Ces précipitations sont pour la plupart des averses orageuses.

— *De fréquentes chutes de grêle* (3,5 jours en moyenne par an). Leur intensité est parfois d'une extrême violence. Statistiquement, le quart des récoltes est détruit chaque année par la grêle.

— *Des vents humides de secteur Nord-Est, Nord et Sud-Est.*

— *Le vent Zonda.* Le Zonda est un vent appartenant à la famille des « Foehn », vents que l'on rencontre dans différentes parties du monde sous diverses dénominations. Nous n'aborderons pas dans cette présentation climatique les conditions de formation du Zonda, qui sont particulièrement complexes. Indiquons seulement qu'une tentative d'explication a été donnée par Georgii (1953).

Nous nous bornerons à synthétiser les données rassemblées par Capitanelli (1967) et Arnal (1975) afin de caractériser le Zonda.

Le Zonda est qualifié de vent « accidentel » car sa fréquence annuelle est extrêmement variable. Elle oscille de zéro (1920) à une dizaine (11 en 1912). Bien que ce vent puisse souffler à n'importe quelle saison, il est plus habituel en hiver et au printemps. Sa direction, fonction de la topographie locale, varie de Nord-Ouest à Sud-Ouest. Sa vitesse est élevée : le maximum enregistré est de 112 kilomètres/heure. Enfin, la durée d'un Zonda est variable, de l'ordre de quelques heures à une dizaine d'heures.

C'est au niveau des modifications qu'il entraîne sur les facteurs du climat que le Zonda exprime son caractère particulier :

— diminution du rayonnement global par augmentation du trouble atmosphérique consécutif au transport de particules solides ;

— augmentation rapide de la température de plusieurs degrés (Capitanelli mentionne une élévation de température de 23,8 °C en quelques heures) ;

— chute brutale de l'hygrométrie à des valeurs inférieures à 10 p. 100 (Capitanelli signale une chute de 60 p. 100 en 3/4 d'heure) ;

— augmentation considérable du pouvoir évaporant de l'air.

En résumé, le Zonda se présente donc comme un vent accidentel, violent, sec et chaud, généralement chargé de poussière.

— *Une évapotranspiration potentielle élevée* (1 200 millimètres/an, calculée par la formule de Penman) : 170 millimètres/mois en été (janvier), faible en hiver (32 millimètres en juin et 39 millimètres en juillet).

— *Un bilan hydrique théorique toujours déficitaire* (900 millimètres de déficit total par an), ce qui implique la nécessité d'irriguer les plantes cultivées. Les cultures sans

irrigation ne peuvent survivre : la végétation naturelle autour des zones irriguées est typique des steppes arides.

La région de San Rafael se caractérise donc par l'aridité de son climat et par l'existence d'accidents climatiques (gelées, grêle, vent violent) assez fréquents qui contribuent fortement à l'irrégularité de la production agricole. Aussi l'I. N. T. A. (Instituto Nacional de Technologia Agropecuaria), a-t-il inscrit à son programme d'activité les trois thèmes d'étude suivants :

— lutte contre les gelées,
— lutte contre la grêle,
— lutte contre le vent.

On conçoit en particulier l'intérêt qu'il y a à développer des études sur les brise-vent, en tenant compte des résultats obtenus par ailleurs, afin de préciser les incidences des rideaux d'arbres sur la production végétale, dans les conditions climatiques locales.

L'étude du rôle protecteur des brise-vent vis-à-vis des vents de régime général, développée dans cette 1re partie, a été menée sur la vigne, dont l'importance économique est considérable dans la région de San Rafael.

Notre objectif était de généraliser à la vigne les méthodes d'échantillonnage mises au point sur le cas particulier du Bocage Breton (Delecolle et Simon, 1974), pour mettre en évidence et préciser les incidences des rideaux d'arbres sur cette culture.

II. — Matériel et techniques

2.1. — *La plante*

La variété de vigne retenue est la variété Malbeck en raison de sa grande extension dans la région.

Toutes les plantes étudiées ont le même mode de conduite (palissage sur fil de fer) et sont toutes soumises au même système de taille (taille Guyot avec tire-sève). Les ceps retenus présentent tous un développement comparable, notamment une hauteur de tronc sensiblement constante : cette condition est indispensable compte tenu de l'étude de Lafon (1966) qui montre l'influence de ce paramètre sur la précocité de floraison et de véraison.

2.2. — *La parcelle expérimentale*

La parcelle retenue pour l'étude a été choisie de façon à ce qu'elle possède des brise-vent perpendiculaires aux vents dominants de direction Nord, Nord-Est et Sud-Est. Les rideaux d'arbres sont donc orientés Ouest-Est.

Les brise-vent sont constitués de peupliers. Ils sont homogènes en hauteur (10 mètres) et en densité.

La parcelle est plate (légère pente de l'Ouest vers l'Est). Elle est plantée de vigne en rangs parallèles aux brise-vent. L'irrigation est faite à la raie, parallèlement aux brise-vent.

Les principales caractéristiques de la parcelle sont rassemblées sur la figure 1.

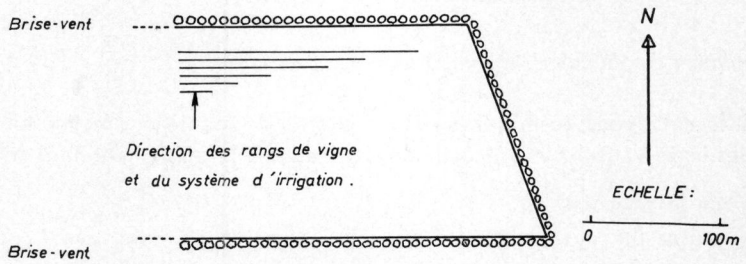


FIG. 1. — *Plan de la parcelle expérimentale.*

2.3. — *La technique de sondage parcellaire*

Le plan expérimental type d'étude des effets biologiques des brise-vent (Delecolle et Simon, 1974), a été appliqué et adapté à la plante retenue pour l'étude : la vigne.

2.31. *Application du plan expérimental à la parcelle.*

Les mesures ont été effectuées selon un axe Nord-Sud perpendiculaire aux haies distantes de 160 mètres, soit 16 fois leur hauteur H (H = 10 mètres). En fonction du plan d'expérience adopté, les observations ont été effectuées à des distances des haies égales à 1 H, 3 H, 5 H du brise-vent Nord, 8 H au milieu de la parcelle, 1 H, 3 H, 5 H du brise-vent Sud, comme le montre la figure 2.

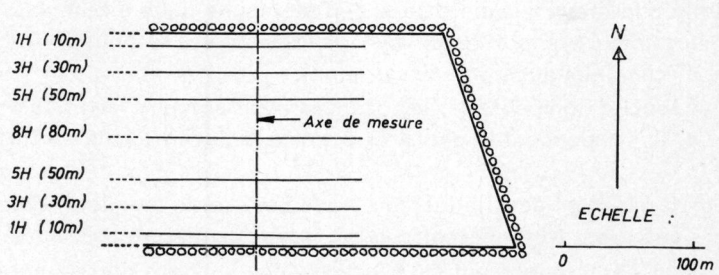


FIG. 2. — *Le plan d'expérience (axe et distances d'étude).*

Pour des raisons essentiellement pratiques, nous n'avons pas retenu de parcelle témoin (difficulté de trouver dans la zone irriguée, une parcelle située en zone ouverte telle que variété, mode de conduite, système d'irrigation, irrigation... soient comparables).

Un témoin nous aurait permis de comparer l'homogénéité intra-parcellaire d'une parcelle non entourée de brise-vent par rapport à celle de la parcelle protégée. Il ne nous aurait pas autorisé, compte tenu des travaux antérieurs que nous avons développés, à mettre en évidence des différences inter-parcellaires, ce type d'analyse relevant d'une étude régionale beaucoup plus complexe.

2.32. *Adaptation du plan expérimental à la plante.*

Les différents types de mesures ont été choisis de manière à mettre en évidence les effets des brise-vent sur la précocité, la croissance et le rendement final de la vigne.

Effets sur la précocité ([1]) :

— repérage des stades floraison et nouaison (Baggiolini, 1952) ;

— repérage du stade véraison (changement de couleur des baies).

Effets sur la croissance ([2]) :

— longueurs des sarments ;

— longueurs des grappes (bonne corrélation entre poids sec des grappes et longueur, de la nouaison à la véraison (Simon, 1976)).

Effets sur la maturation :

— teneurs en sucre (à l'aide du réfractomètre Bertuzzi).

Effets sur la production finale :

— poids frais des grappes à la récolte.

Les organes observés ont été choisis dans des positions comparables sur les ceps, afin de limiter les fluctuations dues à leur alimentation.

Les sarments choisis sont ceux qui se développent à partir d'un bourgeon terminal des coursons à deux yeux. Un sondage préalable a été effectué sur les longueurs de sarments pour déterminer la taille d'échantillon qu'il faudrait prélever pour obtenir une précision de la mesure égale à 20 p. 100 (donc une taille d'échantillon telle que l'intervalle de confiance autour de la moyenne vraie ait une étendue de 0,2 $\overline{X}$, $\overline{X}$ étant la moyenne d'échantillonnage, soit 50 sarments).

Dans un souci d'homogénéité, les grappes choisies pour les mesures suivantes sont celles qui se développent le plus près de la base des sarments considérés précédemment.

On pourra observer dans le tableau 1 que cette taille unique d'échantillon (50) conduit à des précisions très différentes, selon le type de mesure considéré.

Les diverses observations ont été répétées dans le temps afin de pouvoir suivre l'évolution de la croissance et du développement des grappes et des sarments aux différentes distances des brise-vent.

([1]) Les stades antérieurs à la floraison n'ont pu être déterminés.
Par convention, les grappes d'une distance donnée sont à un stade déterminé quand 50 p. 100 de ces grappes sont à ce stade.

([2]) Ces mesures ont été faites sur les organes en place, sans prélèvement, de manière à pouvoir suivre l'évolution dans le temps des mêmes organes.

TABLEAU 1

Tailles d'échantillons et précisions correspondantes pour les différents types d'observations envisagées

Samples size and corresponding precisions for the different types of observations

Type de mesure	Organe mesuré	Mode d'échantillonnage	Taille (N)	Précision (K)
Stades phénologiques.....	grappe en place	grappe par grappe	50	?
Longueur de sarment.....	sarment en place	sarment par sarment	50	20 p. 100
Longueur de grappe.....	grappe en place	grappe par grappe	50	15 p. 100
Teneur en sucre.....	grains prélevés	grain par grain	50	5 à 10 p. 100
Poids des grappes.....	grappes prélevées	grappe par grappe	50	25 p. 100

2.4. — *Analyse statistique des données*

Pour les résultats issus de comptages, nous avons fait appel aux tests χ^2 d'homogénéité ; pour les résultats issus de mesures, nous avons utilisé l'analyse de variance. Les résultats de cette dernière ne seront pas présentés ici afin de ne pas alourdir le texte, seuls seront exposés les résultats des comparaisons multiples de moyennes par la méthode de Newman et Keuls.

III. — Résultats

3.1. — *Généralités sur la présentation des résultats*

Ces résultats sont présentés essentiellement, soit sous forme de diagrammes en bâtons pour les résultats issus de comptages, soit sous forme de graphiques pour les résultats des mesures où figurent :

— les profils des différentes mesures (chaque graphique présente plusieurs courbes obtenues en portant en abscisse les distances aux brise-vent et en ordonnée les valeurs moyennes de la mesure considérée, chaque courbe correspondant à une date déterminée) ;

— les tranches de valeur non significativement différentes (ces tranches représentent les différents regroupements des moyennes par la méthode de Newman et Keuls). Deux valeurs situées dans une même tranche ne sont pas significativement différentes. On remarquera que des groupes de valeurs statistiquement homogènes peuvent se chevaucher, ce qui explique certains recouvrements sur les figures.

3.2. — *Effets des brise-vent sur la précocité de floraison, nouaison, véraison*

Nous avons regroupé dans ce paragraphe les effets des brise-vent sur la floraison, la nouaison et la véraison, car pour ces trois types d'observations, les incidences des

rideaux d'arbres sont comparables : elles traduisent l'augmentation de la précocité par le brise-vent (fig. 3).

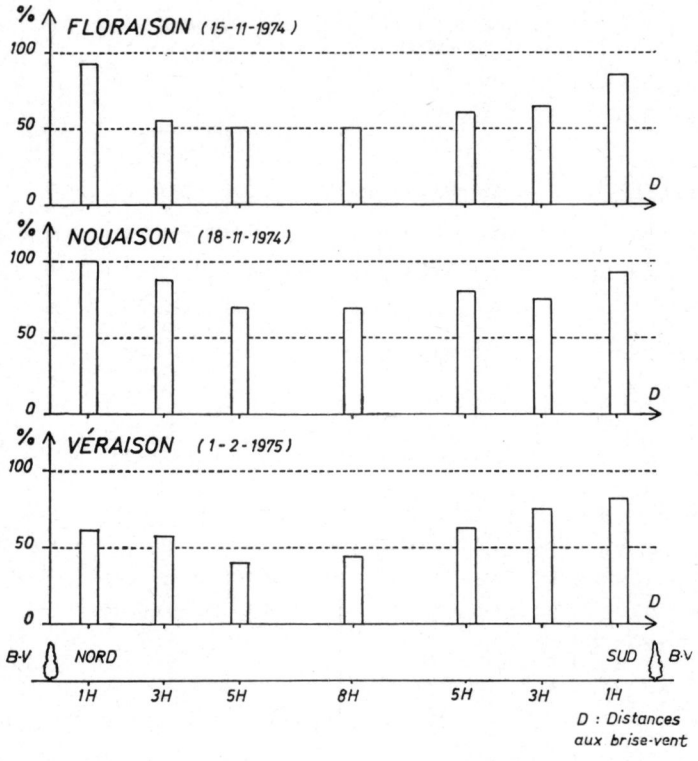


FIG. 3. — *Effets des brise-vent sur la précocité de floraison, nouaison et véraison.*

Cette figure présente en ordonnée le pourcentage de grappes au stade considéré et en abscisse les distances aux brise-vent exprimées en multiples de la hauteur « H » de ce dernier.

Le test χ^2 d'homogénéité (comparaison inter-distances des pourcentages de grappes à un stade donné) montre des différences significatives entre distances : $\chi^2 = 50{,}44$ (floraison), $\chi^2 = 24{,}39$ (nouaison), $\chi^2 = 27{,}99$ (véraison), tous supérieurs à la valeur théorique (χ^2 0,99 = 16,8, pour 6 d.d.l.).

Vers la mi-novembre, on constate que la précocité de floraison et de nouaison est plus grande près des brise-vent, aussi bien au Nord qu'au Sud de la parcelle. Plus tard en février, on note toujours une plus grande précocité près de deux rideaux d'arbres, mais l'effet est nettement plus marqué au Sud de la parcelle. Il est intéressant de noter, pour cette dernière observation, que l'incidence du brise-vent se traduit par un remarquable étalement des dates de véraison (notées quand 50 p. 100 de grappes sont à ce stade). On peut classer les distances par ordre de précocité décroissante : 1 H (Sud), 3 H (Sud), 5 H (Sud), 1 H (Nord), 3 H (Nord), 8 H et 5 H (Nord). La différence entre extrêmes est de l'ordre de 5 jours.

3.3. — *Incidences des brise-vent sur l'élongation des sarments*

La figure 4 qui présente les résultats de mesures de longueurs de sarments pour 5 dates, met en évidence des différences de vitesses de croissance suivant les distances aux brise-vent.

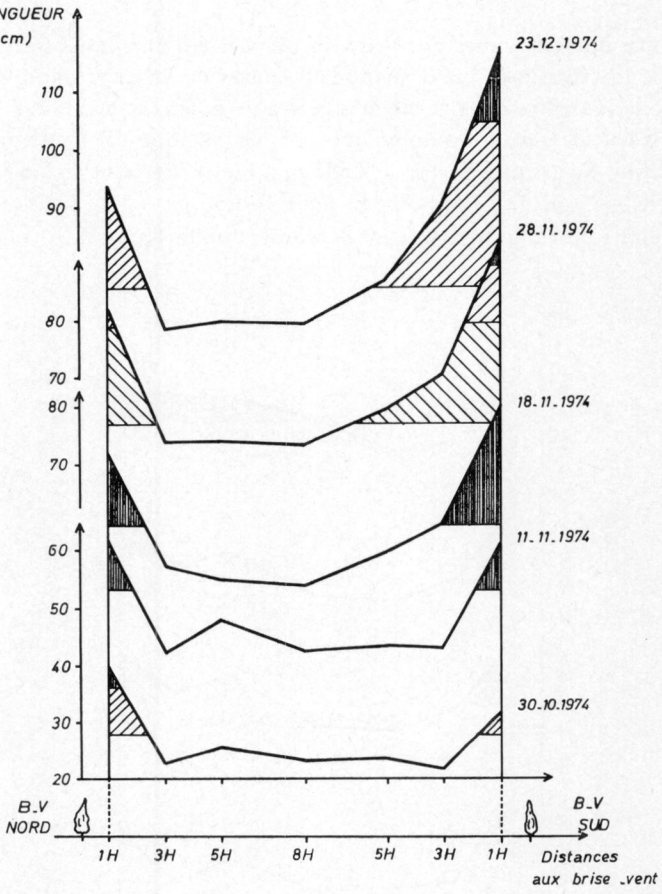


FIG. 4. — *Profils des longueurs de sarments entre deux brise-vent.*

En début de croissance, les sarments sont plus longs au voisinage immédiat des brise-vent (1 H Nord et Sud). Ce phénomène se perpétue jusqu'à la mi-novembre, puis s'amplifie considérablement près du brise-vent Sud. L'effet bénéfique du brise-vent y est alors marqué jusqu'à 5 H, soit environ 50 mètres. Au-delà du 23 décembre, les mesures des sarments n'ont pas pu être poursuivies en raison d'un pourcentage de bris important inhérent au système de palissage.

Ainsi, si l'on excepte l'effet de bordure qui n'a pu être étudié, l'effet des brise-vent se traduit sur la croissance des sarments par l'existence de :

— une zone « bénéfique » principalement marquée au voisinage du brise-vent Sud sur une largeur au maximum égale à 50 mètres,

— une zone où le brise-vent n'exerce plus d'influence directe au-delà de 50 mètres.

3.4. — *Incidence des brise-vent sur l'élongation des grappes*

La mesure des longueurs des grappes permet d'avoir une assez bonne idée de l'évolution de la croissance de la grappe en raison de la corrélation que nous avons établie par ailleurs entre cette caractéristique et le poids sec de celle-ci (Simon, 1976). Il est néanmoins intéressant de noter que cette corrélation est meilleure au début de la croissance de la grappe ($R_{OBS} = 0{,}847/r_{0,995} = 0{,}764$ pour 8 d.d.l.) qu'en fin de croissance ($R_{OBS} = 0{,}732/r_{0,975} = 0{,}632$ pour 8 d.d.l.).

Les résultats de cette mesure sont présentés sur la figure 5.

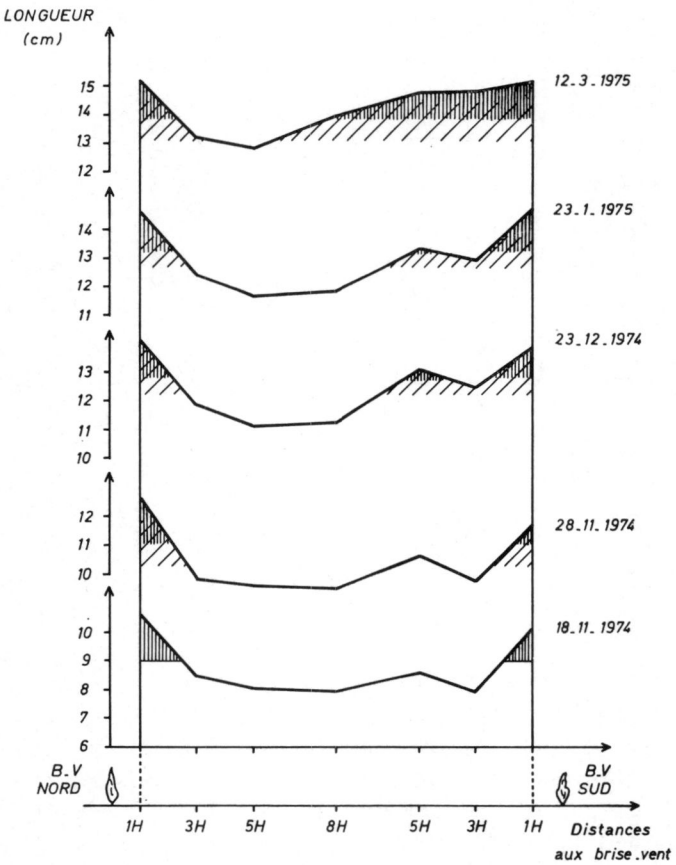


FIG. 5. — *Profils des longueurs des grappes entre deux brise-vent.*

L'évolution dans le temps des profils de longueurs de grappes est assez comparable à celle des longueurs de sarments. En début de croissance, les grappes les plus grandes sont situées au voisinage immédiat des brise-vent (1 H Nord et Sud). Puis, à partir du 28 novembre, l'effet du brise-vent Sud devient plus important en largeur (mais non en intensité). A la récolte, l'effet bénéfique Sud peut être appréhendé jusqu'à 8 H (soit 80 mètres). L'effet du brise-vent Nord est assez constant dans le temps (seul 1 H est affecté).

3.5. — *Incidence des brise-vent sur la maturation*

La figure 6 qui présente les résultats des teneurs en sucre du jus (en ° Baumé), met en relief les phénomènes suivants :

— Lors de la 1re observation (13 février), un effet bénéfique du brise-vent Sud est individualisé. Cet effet est très important, puisque l'on enregistre alors une différence de teneur en sucre de l'ordre de 2° Baumé entre les grappes les plus en avance (1 H Sud) et celles qui sont en dehors de la zone d'influence du brise-vent. Quand on s'éloigne du rideau d'arbres Sud, la décroissance des teneurs en sucre est particulièrement remarquable : il existe alors un véritable gradient des teneurs en sucre.

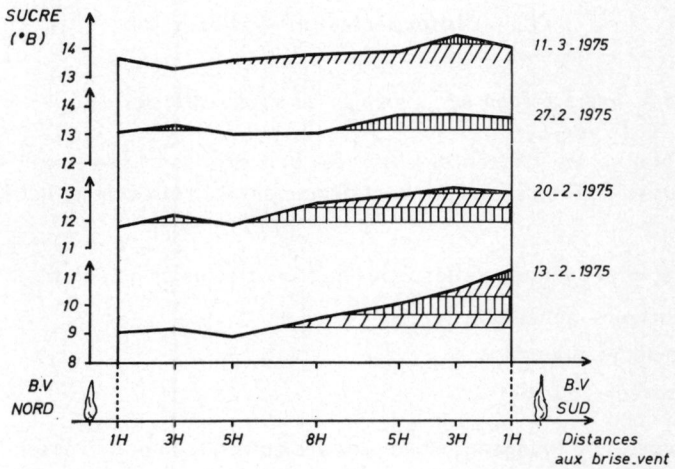


FIG. 6. — *Profils des teneurs en sucre (° Baumé) entre deux brise-vent.*

— Plus tard, cet effet s'atténue. Dès le 27 février, un rattrapage partiel de maturité est opéré par les grappes situées aux distances les plus en retard. Néanmoins à la récolte, un gain de teneur en sucre encore substantiel (0,5° Baumé) peut être mis en évidence.

3.6. — *Incidence des brise-vent sur le poids frais des grappes*

La figure 7 met en évidence une incidence très positive du brise-vent Sud sur le poids frais des grappes. L'augmentation de poids est considérable, puisque supérieure à 50 p. 100, sur une distance de 50 mètres (1).

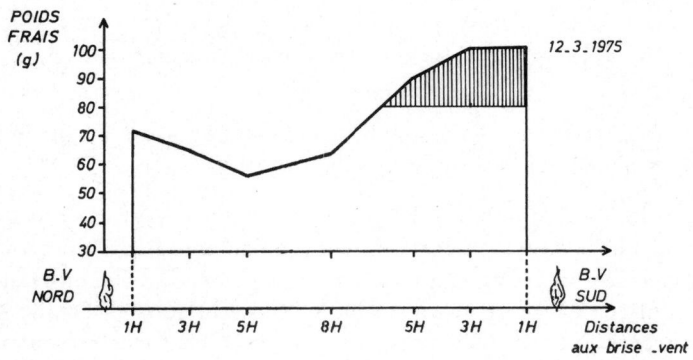


FIG. 7. — *Profils des poids frais des grappes à la récolte entre deux brise-vent.*

IV. — Interprétation — discussion

4.1. — *Interprétation des « profils » observés entre les deux brise-vent*

Pour expliquer les différences observées derrière les brise-vent, il faut connaître la variabilité des différents facteurs dont dépendent la croissance et le développement de la vigne.

Ces facteurs peuvent être regroupés en trois classes principales :

— les facteurs génétiques,

— les facteurs culturaux,

— les facteurs du milieu.

Ces facteurs, non indépendants les uns des autres, forment un ensemble complexe (Nigond, 1972) et comme nous voulions mettre en évidence l'influence des facteurs du climat, nous avons essayé d'éliminer l'influence des autres facteurs.

Aussi, nous sommes-nous placés dans des conditions expérimentales telles que les deux premières classes de facteurs puissent être écartées : même variété, homo-

(1) L'augmentation du poids des grappes de 50 p. 100, comparée à une augmentation des longueurs de 15 p. 100, laisse supposer que la corrélation poids-longueur n'est pas aussi bonne que nous l'avions indiquée. En réalité, cette différence s'explique par le fait que les grappes situées au-delà de 5 H Sud présentent toutes de la coulure, alors que la corrélation a été établie sur des grappes saines.

généité des interventions de l'agriculteur au niveau du sol (1), même mode de conduite des vignes, même système de taille. Néanmoins, l'expérimentation n'ayant eu lieu que sur une seule parcelle, une incertitude demeure quant à l'importance d'un des facteurs du milieu : le facteur sol. La possibilité d'un gradient édaphique qui pourrait jouer sur la fertilité ne peut être délibérément écartée.

C'est au niveau des facteurs du climat que nous allons chercher une interprétation de nos résultats. Nous analyserons dans un premier temps les conditions climatiques générales au cours de la campagne agricole 1974-1975, puis dans un second temps, nous expliquerons les effets observés par les incidences microclimatiques des brise-vent.

4.11. *Place de la campagne de mesure dans la série climatologique.*

Du point de vue climatique, la campagne agricole 1974-1975 s'est caractérisée par les températures élevées du mois de février, une humidité relative supérieure à la moyenne de décembre à mars, des précipitations très importantes, la dominance des vents Sud-Est, *Est* et Nord-Est, enfin par un Zonda très violent de direction Ouest-Sud-Ouest, le 23 novembre.

Ces phénomènes climatiques se sont traduits au niveau de la vigne, par une *importante coulure (due au Zonda) sur les ceps non protégés*, une violente attaque de *Peronospora* en février et une date de récolte légèrement plus tardive. Il est de plus important de signaler que l'efficacité des brise-vent de la parcelle expérimentale a été diminuée, en raison de l'exceptionnelle importance des vents de secteur Est.

4.12. *Interprétation des phénomènes observés par les effets microclimatiques des brise-vent.*

Indiquons dès à présent que cette interprétation est en majeure partie théorique. Elle est faite à partir des résultats de Guyot (1976) que l'on peut résumer comme suit : l'effet des brise-vent se traduit principalement par l'existence d'une zone, du côté sous le vent, où la vitesse du vent est plus faible, les températures de l'air au voisinage du sol plus élevées et l'évaporation Piche réduite (seule cette dernière caractéristique a pu être vérifiée (Simon, 1976)). Cette zone, d'une cinquantaine de mètres de large, rassemble donc des conditions climatiques apparemment plus favorables à la croissance et au développement des plantes. Du côté au vent, la zone favorable est moins marquée, l'orientation jouant alors un rôle primordial.

Analysons de façon plus précise les effets des brise-vent sur la lumière et la température, dont le rôle est déterminant sur la croissance de la vigne (Kliever et Schultz, 1964 ; Kliever, 1964 ; Kliever, Lider et Schultz, 1967 ; Kliever et Lider, 1968). Ces

---

(1) En ce qui concerne l'irrigation, un certain nombre de précautions élémentaires ont été prises pour limiter l'hétérogénéité intraparcellaire :

— les points d'observation sont situés loin des canaux d'amenée (d'où l'impossibilité d'étudier l'effet dépressif de bordure dû aux brise-vent, un canal d'amenée les longeant) ;

— les points d'observation sont situés sur un même rang (ceci a pour effet d'introduire une hétérogénéité intra-distance des quantités d'eau disponibles (Grassi et Navarrete, 1966) qui est probablement plus grande qu'une hétérogénéité inter-distance si l'on postule que l'agriculteur apporte la même quantité d'eau à chaque rang).

auteurs ont en effet montré que le rayonnement solaire global est en relation avec la teneur en sucre des baies et que la température est l'un des facteurs déterminants du métabolisme des baies en cours de croissance.

Les figures 8 et 9 mettent en évidence les effets théoriques des brise-vent sur ces deux facteurs par deux vents de régime différent : de Nord (fig. 8) et de Sud (fig.9).

Ces figures permettent de constater que les zones d'influence des brise-vent sur les facteurs considérés dépendent de l'orientation d'une part, et de la direction du vent, d'autre part. Il importe donc de connaître la direction du vent au cours de la période de végétation de la vigne (tabl. 2).

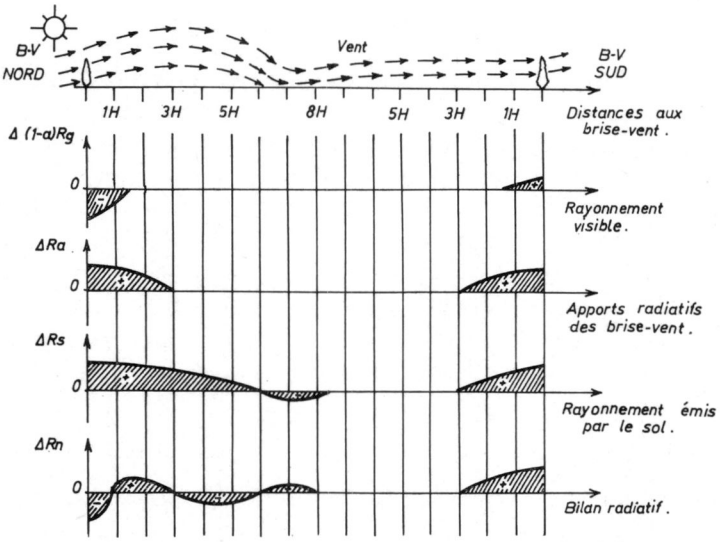


FIG. 8a. — *Représentation schématique des effets des brise-vent de la parcelle sur le bilan radiatif au cours d'une belle journée (vent de secteur Nord) (d'après G. Guyot, 1976).*

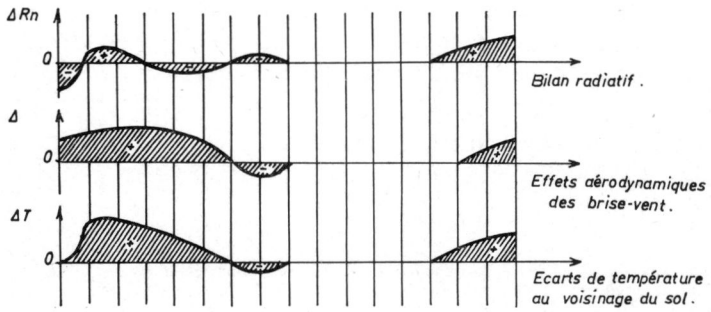


FIG. 8b. — *Représentation schématique des différents modes d'action des brise-vent sur les températures au voisinage du sol (vent de secteur Nord) (d'après G. Guyot, 1976).*

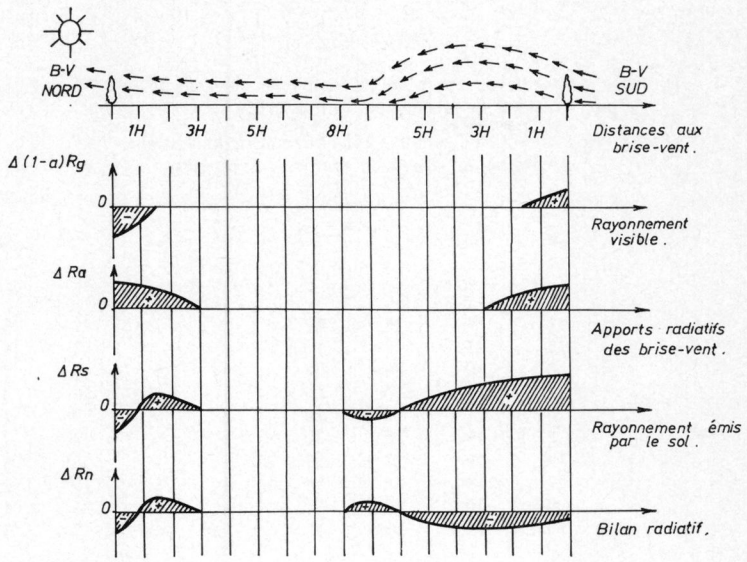


FIG. 9a. — *Représentation schématique des effets des brise-vent de la parcelle sur le bilan radiatif au cours d'une belle journée (vent de secteur Sud) (d'après G. Guyot, 1976).*

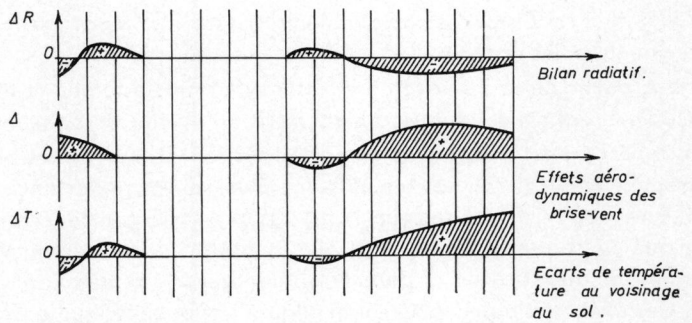


FIG. 9b. — *Représentation schématique des différents modes d'action des brise-vent sur les températures au voisinage du sol (vent de secteur Sud) (d'après G. Guyot, 1976).*

Ce tableau montre, d'un point de vue global, que les vents interceptés par le brise-vent Nord (c'est-à-dire les vents de secteurs Nord-Ouest, Nord et Nord-Est) représentent 29,0 p. 100 des vents, alors que les vents interceptés par le brise-vent Sud représentent 35,9 p. 100 des cas. Par ailleurs, un examen plus détaillé de l'évolution dans le temps des directions des vents met en évidence des fluctuations sensibles du régime des vents « par période ». Ces fluctuations sont néanmoins peu importantes, compte tenu de la brièveté des périodes d'observation.

TABLEAU 2

Direction des vents au cours de la campagne agricole 1974-1975, *par périodes de végétation* (en p. 100)

Winds direction during the 1974-1975 *agricultural year according to vegetation periods* (in p. 100)

	N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O	Calme
1.9/30.10	11	9	19	19	8	7	11	5	9
31.10/11.11	8	25	19	19	11	3	8	6	0
12.11/18.11	0	0	24	28	24	5	5	0	14
19.11/28.11	17	17	17	10	3	7	20	3	6
29.11/23.12	10	21	17	24	12	9	4	1	0
24.12/23.1	8	19	20	30	2	9	3	2	6
24.1/13.2	14	16	12	24	8	5	8	5	8
14.2/27.2	17	14	14	14	2	5	0	2	31
28.2/11.3	0	20	17	19	11	0	6	6	19
1.9/11.3	10,0	15,2	18,0	21,7	7,8	6,4	7,6	3,8	9,2

On peut donc s'attendre, en fonction de ce résultat, à observer des effets bénéfiques aussi bien au voisinage du brise-vent Sud que du brise-vent Nord. C'est effectivement ce qui est constaté en début de végétation, jusqu'à la mi-novembre environ. L'effet bénéfique est alors très limité dans l'espace, puisqu'il n'affecte que 1 H Nord et 1 H Sud. On note à ces distances une augmentation de la précocité et une croissance rapide des sarments et des grappes.

Plus tard, à partir de la mi-novembre, cette symétrie s'estompe et laisse place à une zone bénéfique qui s'individualise uniquement au niveau du brise-vent Sud.

Cette dissymétrie peut s'expliquer en partie par les incidences des brise-vent sur les vents de régime général. On note en effet une plus grande importance des vents de secteur Sud que des vents de secteur Nord (35,9 p. 100 contre 29,0 p. 100). De plus, nous avons pu constater (fig. 8 et 9) que la zone chaude côté au vent, est plus marquée au Sud qu'au Nord de la parcelle (influence de l'orientation : phénomène d'ombrage). Ces effets conjugués peuvent expliquer l'effet bénéfique particulièrement marqué à 1 H Sud, mais ils n'expliquent pas la disparition de la zone bénéfique Nord.

La disparition quasi totale de cette dernière zone est à mettre en relation avec *les dégâts causés par le Zonda du* 23 *novembre*. Ce Zonda, de direction Ouest-Sud-Ouest, a causé de gros dommages sur les ceps (coulure et bris de sarments), excepté à 1 H et 3 H Sud, distances protégées par le rideau d'arbres adjacent (Simon, 1976). Les dégâts observés sur le reste de la parcelle sont vraisemblablement à l'origine de la dissymétrie observée et des grandes différences de poids des grappes mises en évidence à la récolte (le simple effet protecteur du brise-vent Sud, vis-à-vis des vents de régime général, ne pouvant expliquer à lui seul une augmentation de poids frais de l'ordre de 50 p. 100).

Ainsi, les phénomènes mis en évidence au niveau de la vigne, semblent s'expliquer de manière satisfaisante par les incidences microclimatiques des brise-vent.

Conclusion

Dans cette étude sur la protection des cultures des vents de régime général à l'aide de brise-vent naturels, un certain nombre de réponses ont été données sur le plan méthodologique et sur le plan biologique.

Du point de vue méthodologique, nous avons montré comment adapter « le plan expérimental-type de l'étude des incidences des brise-vent sur une culture » (Delecolle et Simon, 1974), au cas particulier de la vigne. Des types de mesures satisfaisants ont été définis et les tailles d'échantillon correspondantes ont été calculées pour différentes précisions souhaitées (Simon, 1976).

Du point de vue agronomique, nous avons pu mettre en évidence quelques incidences des brise-vent sur la vigne. L'effet protecteur du rideau d'arbres se traduit essentiellement par :

l'existence d'une zone « bénéfique » :

— parallèle au brise-vent protégeant des vents dominants,
— principalement marquée du côté exposé au Nord,
— large d'une cinquantaine de mètres ;

l'existence d'effets favorables à la culture sur cette zone :

— une augmentation de la précocité (plus marquée en fin de cycle qu'au début). Floraison, nouaison, et principalement véraison sont plus précoces,
— une croissance plus rapide des sarments et des grappes,
— une teneur en sucre légèrement plus élevée (ce qui peut se traduire par une récolte plus précoce de cette zone),
— un poids moyen des grappes plus élevé.

Ces effets sont en parfait accord avec les résultats déjà observés précédemment dans d'autres conditions de milieu (Bates, 1944 ; Staple et Lehane, 1955 ; Delecolle et Simon, 1974). Néanmoins, il est intéressant d'insister sur le fait que l'intensité de l'effet protecteur des brise-vent est beaucoup plus marquée sous ce type de climat qu'en zone tempérée : ceci est vraisemblablement dû au fait que le rôle protecteur des rideaux d'arbres s'exerce non seulement vis-à-vis des vents de régime général, mais aussi vis-à-vis des dégâts mécaniques dus aux vents accidentels, ce dernier effet semblant être prépondérant.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Study of windbreaks agronomic effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina
I. — Windbreak effects on growth and development of vines as a pattern culture

This study has allowed us to extend a general method for the study of windbreak biological effects to the particular case of vines. We have specified the incidences of natural windbreaks on this culture under the arid climatic conditions of the Middle West of Argentina. These effects agree with those observed in temperate climate (particularly in Brittany). An advance in precocity (flowering time, fruit setting, turning and ripening stages) and an increasing of production are the main effects appearing near the windbreaks. This result points out the double influence of windbreaks : permanent protection against common winds and occasionnal protection against high-speed winds.

Zusammenfassung

Untersuchung der landwirtschaftlichen Einflüsse der Windschirme auf die bewässerten Flächen im Mittelwestens Argentiniens

Erster Teil : Wirkungen der Windschirme auf das Wachstum und die Entwicklung einer standardkultur : die Rebe

Diese Untersuchung führte zu einer Verallgemeinerung einer Untersuchungsmethodik der biologischen Effekte der Windschirme im Einzelfall der Rebe und zu der Bestimmung der Nachwirkungen der natürlichen Windschirme auf diese Kultur unter dem übermässig trockenen Klima des Mittelwestens Argentiniens. Diese Effekte kann man mit denen vergleichen, die in gemässigter Zone (speziell in der Bretagne) beobachtet wurden. Eine Erhöhung der Frühreife (Blüte, Fruchtansatz, beginnende Reife und Reife) und eine Produktionszunahme in der Nähe der Windschirme wurden beobachtet. Die Stärke diese letzten Vongemys scheint erklärbar dadurch, dass die Windschirme hier voll ihre doppelte Rolle spielen : Schutz gegen die Winde allgemeiner Ordnung und Schutz gegen die zufälligen und stürmischen Winde (hier der ZONDA Wind).

РЕЗЮМЕ

Изучение агрономического влияния ветровых щитов в орошаемых перимет рах Центра Западной Аргентины. — I. Влияние ветровых щитов на рост и развитие культуры-типа : виноградная лоза.

Ж. К. СИМОН.

В данной работе применялась методика изучения биологических эффектов ветровых щитов в частном случае виноградной лозы, и уточнялось влияние природных противоветровых полос на эту культуру в слишком засушливом типе климата Центра Западной Аргентины.

Природу этих эффектов можно приравнить к эффектам наблюдающимся в умеренной зоне (особенно в Бретани). Выявлены были : увеличение скороспелости (более ранние цветение, завязывание, начальная спелость и зрелость) и продуктивности поблизости от ветровых щитов. Интенсивность этого последнего явления можно об'яснить тем, что ветровые щиты исполняют в этом случае полностью свою роль : защита от ветров общего режима и от случайных и сильных ветров (в данном случае ветер Зонда).

Références bibliographiques

ARNAL G., 1975. Communications personnelles.

ASLYNG H. C., 1958. Shelter and its effect on climate and water balance. *Oikos*, **9**, 382-402.

BAGGIOLINI, 1952. Stades repères de la vigne. *Revue Romande d'Agric. de vitic. et d'arboric.*, **8** (1), 4-6.

BATES C. G., 1944. The windbreak as a farm Asset. *Farmer's Bulletin*, U. S. Department of Agriculture, n° 1405.

BOUCHET R. J., de PARCEVAUX S., 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'ETP au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 686-694.

CABORN J. M., 1957. Shelterbelts and Microclimate. *Forestry Commission Bulletin*, n° 29.

CAPITANELLI R. G., 1967. *Boletin de Estudios geograficos*. Universidad Nacional de Cuyo, vol. XIV, n° 54-57, 281-307.

CHIAPALE J. P., 1974. A numerical model for estimating the modification of heat budget introduced by hedges. *Seminar on heat and mass transfer in the environment of vegetation*, Yougoslavie, août 1974, 26-30.

DAGNELIE P., 1969. *Théorie et méthodes statistiques*. Gembloux, Duculot, vol. 1 et 2, 378-450.

DELECOLLE R., SIMON J. C., 1974. *Contribution à l'étude des effets des talus boisés sur une culture de Maïs en pays bocager de climat atlantique*. Thèse Université de Rennes, 340 p.

FORSYTHE A. B., BROWN M. B., 1974. The Anava and multiple comparisons for data with heterogeneous variances. *Biometrics*, **30** (4), 719.

GEORGI I. W., 1953. Dinamica del viento Zonda. *Anales de Departamento de Investigaciones cientificas*, t. 1, Cuad. II, 189-199.

GRASSI J., NAVARRETE J. D., 1966. *Riego y drenaje*. I.N.T.A., 601 p.

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. *Ann. agron.*, **14** (4), 429-498.

GUYOT G., 1972. *Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente*. Université de Paris VI, Thèse de Docteur-Ingénieur, 163 p.

GUYOT G., SEGUIN B., 1974. Climat et aménagement en pays de Bocage. Chapitre II. Modifications climatiques et microclimatiques liées à la rugosité du paysage : Aspect théorique, p. 68-117. Rapport interne I.N.R.A.

GUYOT G. *et al.*, 1976. Climat et aménagement en pays de bocage. *Rapport du Contrat du Ministère de l'Agriculture*, p. 767.

KLIEWER W. M., 1964. Influence of environment on metabolism of organic acids and carbohydrates in *Vitis vinifera*. I. Temperature. *Plant Physiol.*, **39** (6), 869-880.

KLIEWER W. M., SCHULTZ M. B., 1964. Influence of environment on metabolism of organic acids and carbohydrates in *Vitis vinifera*. II. Light. *Ann. J. Enol. Vit.*, **15**, 119-129.

KLIEWER W. M., SCHULTZ M. B., LIDER L. A., 1967. Influence of artificial shading in vineyards on the concentration of sugar and organic acids in grapes. *Ann. J. End. Vit.*, **18**, 78-85.

KLIEWER W. M., LIDER L. A., 1968. Influence of cluster exposure to the sun on the composition of Thompson seedless fruit. *Ann. J. Enol. Vit.*, **19**, 175-184.

LAFON J., COUILLAUD P., GAY-BELLILE F., COMPAIN-METERAU D., 1966, 1967. Mode de conduite. Etablissement du tronc à différentes hauteurs au-dessus du sol. *Progr. agric. vitic.*, 83e année, n° 24, 337-341 et 84e année, n° 1, 10-14.

MORICE E., 1972. Tests de normalité d'une distribution observée. *Rev. Stat. Appl.*, **XX** (2), 5-35.

NAGELI, 1965. Über die Windverhältnisse im Bereich Gestaffelter Windschutzstreifer. *Mémoires Inst. Suisse de Recherches Forestières*, **41**, (5), 221-300.

NIGOND, 1972. Le rôle du climat en viticulture. *Connaissance de la vigne et du vin*, t. **5**, (4) 1971 et t. 6 (1) 1972.

SIEGEL S., 1956. *Non parametric statistics for the behavioral sciences*. MacGraw Hill Book, p. 72.

SIMON J. C., 1976. *Contribution à l'étude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine*. Rapport de mission publié par la Station de Bioclimatologie d'Avignon, 95 p.

SIMON J. C., DELECOLLE R., 1976. *Quelques méthodes statistiques appliquées à l'étude des incidences agronomiques d'un aménagement*. Note interne M/76/3, 58 p.

STAPLE W. J., LEHANE J. J., 1955. The influence of field shelterbelts on wind velocity evaporation, soil moisture and crop yield. *Canad. J. Agric. Sci.*, **35** (5), 440-453.

VAN EIMERN J. *et al.*, 1964. *Windbreaks and Shelterbelts*. W. M. O. Technical Note n° 59 (n° 147 TP 70), 190 p.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 95-111.

Minéralisation en sol de craie de l'azote organique des eaux résiduaires de féculerie

J. C. MULLER

avec la collaboration technique de E. MARNE

Station de Science du Sol, I.N.R.A., 51000 Châlons-sur-Marne

Résumé

L'incubation à trois température (0°, 10° et 28 °C) et à une humidité correspondant à l'humidité équivalente (25 p. 100 du sol sec), a permis de préciser le comportement de l'azote organique apporté à un sol calcaire par les eaux résiduaires de féculerie.

La production rapide et importante d'azote est due à la teneur élevée en azote protéique de ces eaux.

La décomposition des substances organiques commence à des températures relativement basses, voisines de zéro degré. A cette température, la vitesse d'ammonification est supérieure à la vitesse de nitrification et l'azote ammoniacal s'accumule en quantité importante (40 à 45 microgrammes/gramme) soit huit à dix fois la teneur normale. Le maximum de production d'azote ammoniacal varie peu avec la température, mais sa persistance dans le sol est d'autant plus brève que la température est plus élevée.

L'analyse de la cinétique de minéralisation de l'azote met en évidence deux formes d'azote dont les vitesses de minéralisation sont différentes. L'azote ammoniacal provient pour l'essentiel de la forme rapidement minéralisable (constantes de vitesse d'ammonification comprise entre — 0,60 et — 6,0 pour des températures comprises entre 0 et 20 °C). La nitrification de l'azote ammoniacal est partielle et d'autant plus faible que la température est basse. 4/5 de l'azote ammoniacal se retrouve sous forme nitrique à 28 °C et seulement 2/3 pour des températures comprises entre 0 et 10 °C.

Les quantités calculées sont du même ordre de grandeur que les quantités d'azote minéral déterminées dans la couche superficielle (0-60 centimètres) du sol à la sortie de l'hiver, 4 à 5 mois après l'épandage.

1. — Introduction

La présence, en Champagne crayeuse, d'importantes industries agricoles liées à la culture intensive pratiquée dans cette région pose le problème de l'élimination de leurs eaux résiduaires. La technique de l'épandage par aéroaspersion ou par billonnage s'est développée rapidement ces dernières années, mais la généralisation de cette technique risque, à plus ou moins long terme, d'avoir des répercussions sur les cultures, les sols et les eaux des nappes phréatiques si des études et contrôles périodiques ne sont pas réalisés.

Des études récentes (Lefèvre, 1974 et 1975 ; Muller, 1974) ont montré l'importance des éléments organiques et minéraux apportés par les eaux de féculerie qui, en

moyenne, sont de 600 kilogrammes d'azote, 140 kilogrammes d'acide phosphorique et 1 300 kilogrammes de potasse à l'hectare pour un épandage de 100 millimètres.

La détermination des éléments totaux contenus dans ces eaux ne renseigne que d'une manière imparfaite sur la disponibilité des éléments qu'elles contiennent. Pour les éléments minéraux solubles ou échangeables, tels que les chlorures ou le potassium et le sodium, la disponibilité peut être facilement appréciée, ce qui n'exclut en aucun cas le problème de leur accumulation à long terme dans le sol. Il en va tout autrement pour les éléments organiques et principalement pour l'azote. Sa vitesse de minéralisation détermine la mise à disposition d'azote minéral aux cultures et le risque d'entraînement des nitrates vers les nappes.

A la sortie de l'hiver, les reliquats d'azote nitrique dans la couche superficielle du sol (0-60 centimètres) sont très élevés dans les parcelles recevant l'épandage des eaux résiduaires de féculerie par rapport à la valeur moyenne observée dans les parcelles n'ayant pas reçu d'eau résiduaire (tabl. 1).

TABLEAU 1

Reliquats d'azote nitrique, à la sortie de l'hiver, dans les 60 premiers cm du sol pour un épandage moyen de 80-100 mm en automne

Fréquence des épandages		Azote nitrique en kg/ha	
		en 1975	en 1976
Sans épandage		26	47
1 épandage	deuxième campagne précédant la détermination du reliquat	84	93
	Campagne précédant la détermination du reliquat.	130	429
2 épandages	deux campagnes consécutives précédant la détermination du reliquat	350	428

Afin de prévoir une utilisation aussi rationnelle que possible des eaux résiduaires de féculerie il est donc nécessaire de préciser l'évolution, dans le sol, de l'azote organique apporté par ces eaux.

L'objectif de cette étude sera limité à l'analyse de la cinétique de minéralisation, à différentes températures, de l'azote organique des eaux résiduaires.

2. — Matériel utilisé et techniques expérimentales

Un sol calcaire typique de la Champagne crayeuse (tabl. 2), rendzine grise sur craie remaniée, est humidifié par la quantité d'eau pure ou d'eau résiduaire de féculerie suffisante pour porter le sol au voisinage de son humidité équivalente (centrifugation donnant une accélération de 1 000 g). Cette condition assure une cohésion suffisante des agrégats, tout en permettant une aération satisfaisante.

TABLEAU 2

Analyse chimique du sol

pH H_2O	8,1
Calcaire total $CaCO_3$ p. 1 000	68,5
Carbone organique C p. 1 000	18,6
Azote total N p. 1 000	1,95
C/N	9,5
Azote ammoniacal N ppm	6,3
Azote nitrique N ppm	55,6
Phosphore assimilable (JH) P_2O_5 p. 1 000	0,23
Potassium échangeable K_2O p. 1 000	0,37
Sodium échangeable Na_2O p. 1 000	0,11
Magnésium échangeable MgO p. 1 000	0,073

La teneur en eau est alors de 25 p. 100 du poids sec, ou pour un sol de densité apparente de 1,3, de 32,5 p. 100 en volume. Pour une épaisseur de sol de 20 centimètres et par unité de surface cela équivaut donc à la rétention d'un arrosage de 65 millimètres supposés uniformément répartis.

La composition de l'eau résiduaire de féculerie est donnée dans le tableau 3. Les substances azotées contenues dans la pomme de terre sont à 50 p. 100 sous forme de protéines coagulables et à 50 p. 100 sous forme d'acides aminés solubles.

Les mélanges sont effectués dans des flacons en verre de un litre dans lesquels on introduit successivement : 150 grammes de terre sèche tamisée à 2 millimètres et 37,5 centimètres cube d'eau résiduaire (essai) ou d'eau déminéralisée (témoin). Les eaux sont incorporées au sol jusqu'à obtention d'un mélange homogène qui est placé immédiatement dans l'étuve à incubation.

TABLEAU 3

Composition de l'eau résiduaire et quantités d'éléments apportés au sol

Déterminations	Composition de l'eau d'épandage de féculerie mg/l	Eléments organiques et minéraux apportés par l'eau résiduaire µg/g de sol sec
pH	5,8	—
Matières en suspension	540	—
Carbonates	0	—
Carbone organique	2 200	550
Azote total	660	165
Azote ammoniacal	7,1	1,8
Azote nitrique	11,8	2,9
Sulfates	180	4,5
Chlorures	65	1,6
Phosphates	190	48
Sodium	6	2
Potassium	1 200	300
Calcium	70	1,8
Magnésium	40	10
C/N	3,3	—

Le tableau 3 donne les quantités d'éléments organiques et minéraux, apportées par les eaux résiduaires. Ces quantités sont exprimées en microgrammes pour 1 gramme de sol sec.

Les incubations sont conduites à 3 températures : 0 °C, 10 °C et 28 °C, maintenues constantes.

L'azote minéral, extrait par KCl 2 N, est dosé périodiquement sur des prises de 25 grammes, entre 3 jours et 52 semaines d'incubation suivant une fréquence indiquée dans les tableaux 4 à 6. Trois prélèvements successifs sont effectués sur chaque échantillon dont la masse en cours d'incubation diminue de 150 à 100 grammes avant le 3e prélèvement. L'échantillon est alors éliminé de la série.

Les essais et dosages sont effectués en double, soit 4 valeurs élémentaires pour une moyenne. Seules les moyennes figurent dans les tableaux.

La technique de dosage est celle préconisée par Bremner et Keeney (1965). Les résultats sont exprimés en microgramme pour 1 gramme de sol séché à 105 °C, auquel on a fourni 165 microgrammes d'azote organique.

3. — Résultats et discussions

Pour ne pas compliquer l'exploitation des résultats expérimentaux, nous avons maintenu constantes, jusqu'au terme des essais, les humidités et les températures du sol. Trois niveaux de température sont réalisés ; un seul niveau d'humidité, l'humidité équivalente a été retenue. Le choix de cette valeur d'humidité n'est pas tout à fait arbitraire. Il représente bien les conditions d'humidité du sol aprés épandage et pendant la période hivernale. Pour un épandage effectué début octobre, cette période couvre une durée de 5 à 6 mois, pendant laquelle s'effectue l'essentiel de la minéralisation. Pour les périodes printanières et estivales, où les amplitudes thermiques et hydriques sont considérables, il est plus discutable. Le problème, à partir de ce moment là, est surtout celui de l'évolution de l'azote nitrique dans le sol.

Les tableaux 4 à 6 donnent les quantités cumulées d'azote minéral (NH_4 et $NO_2 + NO_3$) pour des durées d'incubation comprises entre 0 et 52 semaines. Les nitrites étant toujours ou absents ou en quantités très faibles (sauf au début de l'incubation), nous considérons la somme $NO_2 + NO_3$ comme identique à l'azote nitrique. L'azote ammoniacal et nitrique provenant de l'azote organique de l'eau résiduaire est obtenu par différence entre les quantités d'azote minéral dosé dans l'essai (sol + eau résiduaire) et le témoin (sol + eau déminéralisée).

Compte tenu de la précision des dosages, des valeurs négatives supérieures à — 1 microgramme/gramme n'ont pas de signification.

On retrouve les 2 périodes classiques de l'incubation.

— *Une période très courte d'immobilisation* de l'azote minéral. Elle existe uniquement avec le traitement témoin ; elle est surtout marquée aux températures de 0 et 10 °C.

— *Une période très longue de minéralisation*, au cours de laquelle l'azote organique minéralisé s'accumule.

Nous analyserons dans le détail cette dernière période.

TABLEAU 4

Minéralisation de l'azote organique à 0 °C
(Résultats en µg/g de sol séché à 105 °C)

Temps en semaines	Témoin : sol + eau déminéralisée			Essai : sol + eau de féculerie			Azote minéral de l'eau résiduaire : N minéral (essai-témoin)		
	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral
0	5,3	53,2	58,5	13,3	56,6	69,9	8,0	3,4	11,4
0,43	2,1	48,8	50,9	31,0	48,6	79,6	28,9	— 0,2	28,7
1	1,9	50,5	52,4	34,5	53,6	88,1	32,6	3,1	35,7
2	1,9	55,0	56,9	41,9	58,8	101	40,0	3,8	44
3	3,8	53,8	57,6	43,1	68,3	111	39,3	14,5	53
5	2,4	60,5	62,9	33,5	89,5	123	31,1	29,0	60
8	3,6	63,3	66,9	12,6	121	134	9,0	57,7	67
16	4,7	64,7	69,4	4,7	152	157	0	87,0	87
24	2,7	67,0	69,7	1,7	165	167	— 1,0	98,0	97
32	3,1	70,7	73,8	2,9	168	171	— 0,2	97,0	97
40	2,7	74,6	77,3	2,7	173	176	0	98,0	98
46	3,4	75,7	79,1	3,4	175	178	0	99,0	99
52	3,4	77,1	80,5	3,4	178	181	0	101	101

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CENTRE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

TABLEAU 5

Minéralisation de l'azote organique à 10 °C
(Résultats en µg/g de sol séché à 105 °C)

Temps en semaines	Témoin : sol + eau déminéralisée			Essai : sol + eau de féculerie			Azote minéral de l'eau résiduaire : N minéral (essai-témoin)		
	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral
0	5,3	53,2	58,5	13,3	56,6	69,9	8,0	3,4	11,4
0,43	2,6	50,5	53,1	30,5	56,7	87,2	27,9	6,2	34,1
1	2,7	53,6	56,3	31,1	73,6	105	28,4	20,0	48,4
2	4,0	58,5	62,5	19,2	100	119	15,2	41	56
3	3,8	61,1	64,9	3,8	121	125	0	60	60
5	2,7	66,0	68,7	2,6	140	143	— 0,1	74	74
8	2,9	70,0	72,9	2,1	147	149	— 0,7	77	76
10	4,1	80,7	84,8	4,7	172	177	— 0,6	91	92
24	2,7	79,8	82,5	1,7	163	165	— 1,0	83	82
32	4,8	81,4	86,2	2,9	178	181	— 1,9	97	95
40	3,6	86,3	89,9	2,7	181	184	— 0,9	95	94
46	3,9	87,0	90,9	3,4	179	182	— 0,5	92	92
52	3,8	90,2	94,0	3,4	184	187	— 0,4	94	93

TABLEAU 6

Minéralisation de l'azote organique à 28 °C
(Résultats en µg/g de sol séché à 105 °C)

Temps en semaines	Témoin : sol + eau déminéralisée			Essai : sol + eau de féculerie			Azote minéral de l'eau résiduaire : N minéral (essai-témoin)		
	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral	NH_4	$NO_2 + NO_3$	N minéral
0	5,3	53,2	58,5	13,3	56,6	69,9	8,0	3,4	11,4
0,43	2,1	55,2	57,3	29,0	80,2	109	26,9	25,0	51,9
1	2,4	62,4	64,8	3,8	110	114	1,4	48	49
2	2,9	71,1	74,0	3,8	141	145	0,9	70	71
3	2,9	78,7	81,6	2,9	150	153	0	71	71
5	2,4	89,0	91,4	2,9	167	170	0,5	78	79
8	2,4	100	102	3,3	182	185	0,9	82	83
16	4,7	118	123	5,9	198	204	1,2	80	81
24	1,9	133	135	1,9	223	225	0	90	90
32	2,8	137	140	2,9	239	241	0,1	102	102
40	3,3	140	143	3,1	258	261	— 0,2	118	118
46	3,9	142	146	4,1	262	266	0,2	120	120
52	4,1	145	149	3,8	273	277	— 0,3	128	128

3.1. — *Influence de la température sur la vitesse de minéralisation*

Dans le témoin (sol + eau déminéralisée), la quantité d'azote minéral est pratiquement proportionnelle à la température avec un coefficient de température Q 10 voisin 1,1. Dans l'essai (sol + eau de féculerie), la quantité d'azote minéralisé est plus que proportionnelle à la température.

Pour ces 2 traitements, au voisinage de 0 degré, la minéralisation n'est pas stoppée. Lorsque le sol a reçu un épandage d'eau de féculerie, elle est même très importante. Entre la 1re et la 3e semaine qui suivent le début de l'incubation, la quantité d'azote minéralisé par gramme de sol est de 5,2 microgrammes pour le témoin et de 22,9 microgrammes avec l'essai.

3.2. — *Influence de la température sur la teneur en azote ammoniacal et nitrique*

La prise en compte, séparément, de l'azote ammoniacal et de l'azote nitrique renseigne sur l'influence de la température sur les phases d'ammonification et de nitrification de l'azote organique des eaux résiduaires.

Dans le sol humidifié avec l'eau déminéralisée, la teneur en azote ammoniacal, quelle que soit la température, est toujours comprise entre 2 et 5 microgrammes/gramme de sol pendant les 52 semaines d'incubation.

Dans le sol humidifié avec l'eau résiduaire de féculerie, l'influence de la température sur la présence d'azote ammoniacal est très nette. A 0° degré, la teneur maximum mesurée, 41,9 microgramme/gramme, est atteinte après 2 semaines d'incubation. A 10 degrés, elle est atteinte après une semaine (31,1 microgrammes/gramme). A 28 degrés, le maximum mesuré (29,0 milligrammes/gramme) est atteint en 3 jours et l'azote ammoniacal a pratiquement disparu dès la 2e semaine d'incubation.

Ces observations permettent de constater que l'azote ammoniacal libéré au cours de la minéralisation ne persiste pas dans le milieu et est rapidement transformé en azote nitrique. A 28 degrés, il faut moins d'une semaine pour que la teneur en azote ammoniacal du sol ayant reçu l'eau de féculerie tombe au-dessous de 5 microgrammes/gramme. A zéro degré, il faudra attendre 16 semaines.

3.3. — *Cinétique de la minéralisation de l'azote organique*

Les courbes de production de l'azote ammoniacal et nitrique en fonction du temps (fig. 1 et 2) suggèrent un système de 2 réactions successives du 1er ordre. Pour analyser les données expérimentales, on utilisera le modèle proposé par Knowles *et al.* (1965) et Mac Laren (1969) qui dérivent des équations de Michaelis-Menten (1913) sur la cinétique enzymatique et des travaux de Monod (1942) sur la croissance bactérienne :

$$[\text{N organique}] \xrightarrow{K_1} [NH_4^+] \xrightarrow{k_2} [NO_2^-] \xrightarrow{k_3} [NO_3^-]$$

en admettant que ces réactions soient irréversibles.

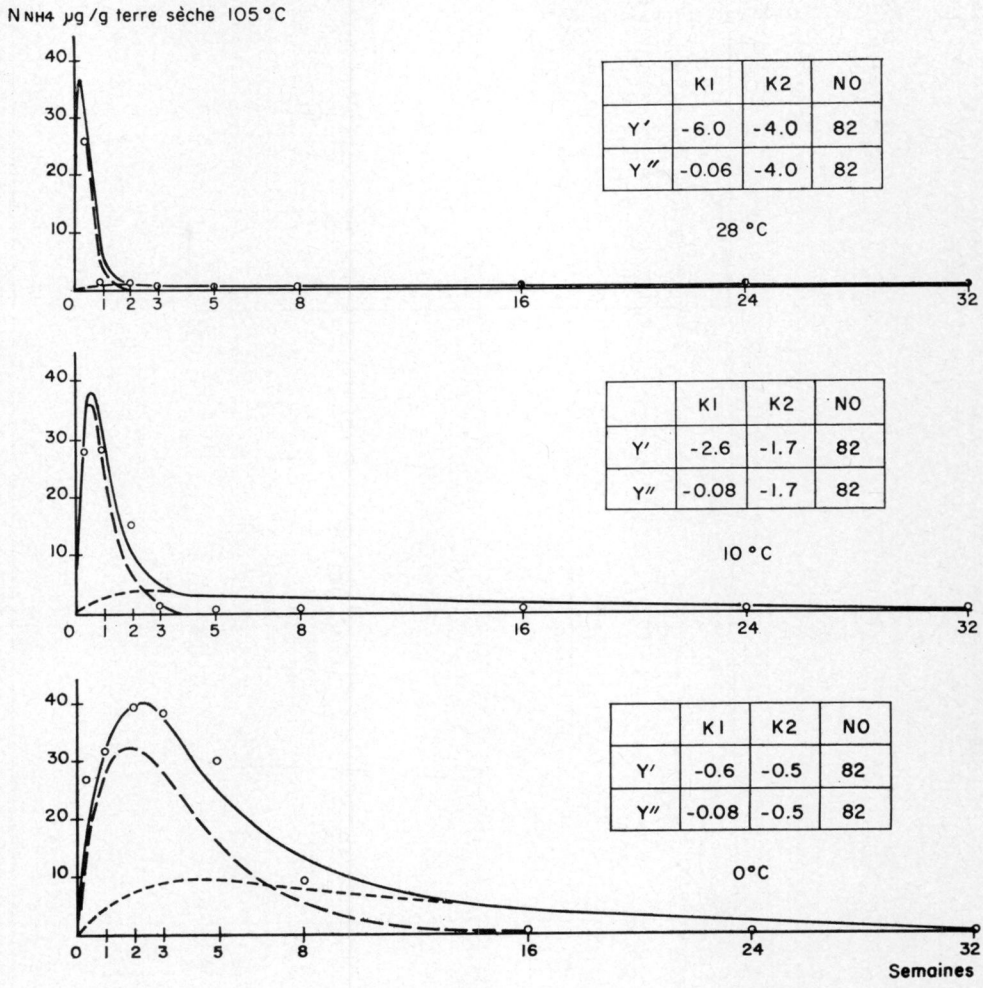


FIG. 1. — *Evolution de l'Azote ammoniacal en fonction du temps.*

(— — — — — — — — —) courbe théorique Y'

(– – – – – – – – – –) courbe théorique Y''

(————————————) courbe théorique Y' + Y''

0 = valeurs expérimentales.

Expérimentalement, on a trouvé des traces de nitrites, donc les 2 réactions successives :

$$[NH_4^+] \xrightarrow{k_2} [NO_2^-] \xrightarrow{k_3} [NO_3^-]$$

peuvent être remplacées par une seule réaction :

$$[NH_4^+] \xrightarrow{K_2} [NO_3^-] .$$

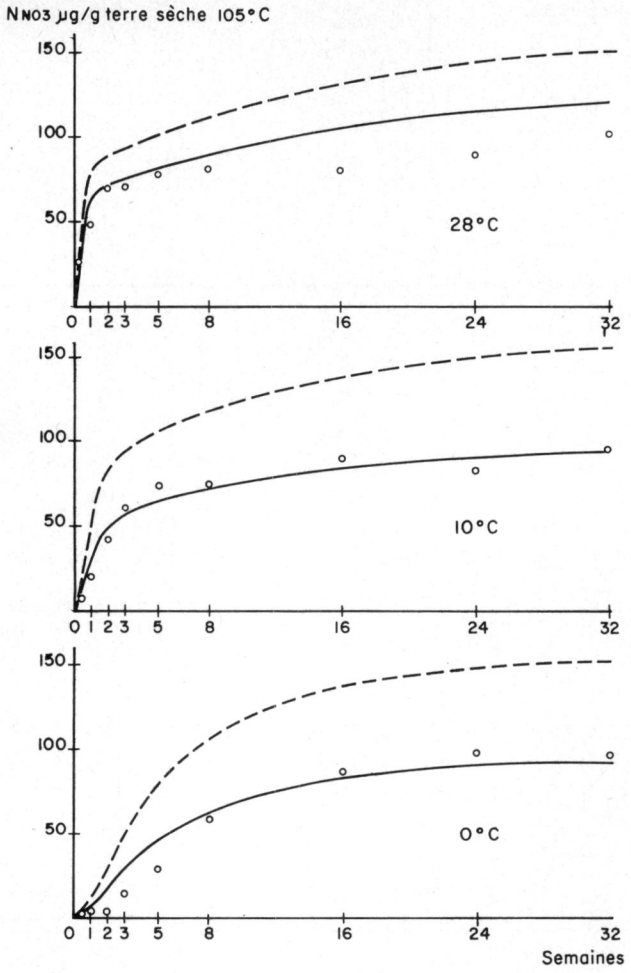


FIG. 2. — *Evolution de l'azote nitrique en fonction du temps.*

(— — — — — — —) courbe théorique

(——————————) courbe théorique calculée pour un rendement en azote nitrique de 0,6 à 0° et 10° et 0,8 à 28 °C.

0 = valeurs expérimentales.

Nous pouvons écrire :

$$d(\text{N org.})/dt = K_1 (\text{N org.}) \quad (1)$$

$$d(NH_4^+)/dt = K_1 (\text{N org.}) - K_2 (NH_4^+) \quad (2)$$

où (N org.) = concentration en azote organique minéralisable

t = temps en semaines

K_1 et K_2 = respectivement constantes de vitesse d'ammonification et de nitrification à la température θ.

La concentration en azote organique minéralisable à l'instant t est donnée par :

$$(N\ org.)_t = (N\ org.)_0 \times e^{K_1 t} \qquad (3)$$

où $(N\ org.)_0$ = Concentration en azote organique minéralisable au temps 0.

La concentration en azote ammoniacal est donnée par :

$$(NH_4^+)_t = \frac{K_1}{K_2 - K_1} (N\ org.)_0 [e^{K_1 t} - e^{K_2 t}] . \qquad (4)$$

La concentration en nitrate au temps t peut se déduire des équations précédentes si la conservation des masses est assurée, ce qui suppose que la totalité de l'azote ammoniacal produit se transforme en azote nitrique :

$$(NO_3)_t = (N\ org.)_0 - [(N\ org.)_t - (NH_4^+)_t] \qquad (5)$$

d'où :

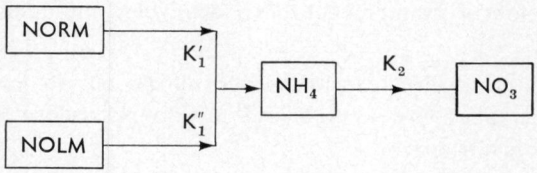
$$(NO_3)_t = (N\ org.)_0 \left\{ 1 - e^{K_1 t} - \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) \right\} . \qquad (5)$$

Nous appliquons ce modèle aux données expérimentales. La concordance entre valeurs calculées et valeurs mesurées permettra de vérifier son exactitude et d'apprécier jusqu'à quel stade il est valable.

La concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées est satisfaisante au stade de l'ammonification, en admettant la présence de 2 substrats en quantité égale à l'origine, évoluant à des vitesses différentes : un substrat organique azoté rapidement minéralisable (NORM) et un substrat organique azoté lentement minéralisable (NOLM).

Cette hypothèse se justifie, si l'on se souvient que les substances azotées de la pomme de terre, donc de l'eau résiduaire, sont pour 50 p. 100 sous forme de protéines coagulables et 50 p. 100 sous forme d'amino-acides solubles.

Le schéma d'évolution du système sera alors le suivant :



ou K_1' et K_1'' représentent respectivement les constantes d'ammonification des substrats organiques rapidement et lentement minéralisables.

Les quantités d'azote ammoniacal et nitrique, présentes à un instant donné seront égales à la somme des quantités provenant de la minéralisation de chacun des 2 substrats. Pour chacun d'eux nous appliquons les équations (3), (4) et (5) établies précédemment.

L'ajustement des équations (3), (4) et (5) aux valeurs expérimentales est effectué à l'aide d'un calculateur électronique programmable en utilisant une méthode identique à celle de Knowles *et al.* (1965).

L'ajustement des courbes calculées de concentration en azote ammoniacal en fonction du temps aux valeurs expérimentales est très satisfaisant aux 3 températures 0°, 10° et 28 °C (fig. 1).

Les constantes de vitesse d'ammonification prennent, en fonction de la température, les valeurs données dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Constantes de vitesse d'ammonification et de nitrification

0	Fraction organique	K_1	K_2	N_0
0 °C	rapidement minéralisable.....	— 0,60	— 0,50	82
	lentement minéralisable.....	— 0,08	— 0,50	82
10 °C	rapidement minéralisable.....	— 2,6	— 1,7	82
	lentement minéralisable.....	— 0,08	— 1,7	82
28 °C	rapidement minéralisable.....	— 6,0	— 4,0	82
	lentement minéralisable.....	— 0,06	— 4,0	82

N_0 = Azote organique minéralisable au temps zéro
K_1 = constantes d'ammonification
K_2 = constantes de nitrification

La constante d'ammonification de l'azote organique rapidement minéralisable K_1 varie linéairement en fonction de la température ($K_1' = — 0.19 — 0.6$). La constante d'ammonification de l'azote organique lentement minéralisable varie peu avec la température et a une valeur faible.

La concordance entre valeurs calculées et valeurs expérimentales est beaucoup moins satisfaisante pour la concentration en azote nitrique (fig. 2), si l'on admet que la totalité de l'azote ammoniacal produit est totalement transformée en azote nitrique.

Or le « carrefour » ammoniacal offre des voies multiples (Dommergues et Mangenot, 1970) :

1° une fraction peut être transformée en nitrate par la microflore nitrifiante,

2° une fraction peut être immobilisée par la microflore qui préfère l'azote ammoniacal à l'azote nitrique,

3° une fraction peut être fixée sous forme très stable sur la matière organique du sol,

4° une fraction peut être perdue par volatilisation sous forme de gaz ammoniac.

Dans les conditions de l'expérience, les fractions fixées sur les minéraux argileux sont infimes ou nulles.

La constante de nitrification K_2 est une constante apparente qui varie linéairement avec la température (tabl. 7).

Cet essai ne permet pas de faire la part revenant à chacun de ces phénomènes, mais il permet, à chaque instant, de mesurer le rendement du système en azote nitrique. Il est défini par le rapport entre la concentration mesurée en azote nitrique au temps « t » et la concentration initiale en azote organique (tabl. 8).

TABLEAU 8

Valeurs calculées et valeurs mesurées d'azote nitrique ; µg/g de sol

	Temps en semaines	1	2	3	5	8	16	24	32	52
$\theta = 0\ ^oC$	N_{NO_3} valeur mesurée...	3,1	3,8	14,5	29,0	58,0	86,9	98,0	97,5	101
	N_{NO_3} valeur calculée...	10,1	29,1	50,9	79,8	117,2	136,8	149,7	155,0	162,5
	rNO_3	1,9	2,3	8,8	18,6	35	53	59	59	61
$\theta = 10\ ^oC$	N_{NO_3} valeur mesurée...	20,0	41,7	60,0	74,0	75,0	90,8	82,9	96,9	93,9
	N_{NO_3} valeur calculée...	53,5	83,7	94,9	106,3	118,6	140,1	151,4	156,2	162,6
	rNO_3	12	26	36	45	45	55	50	59	57
$\theta = 28\ ^oC$	N_{NO_3} valeur mesurée...	48,0	69,6	71,0	78,0	82,0	79,6	90,2	102,0	128
	N_{NO_3} valeur calculée...	81,5	90,1	94,5	102,0	112,5	132,1	144,3	150,2	160,3
	rNO_3	29	42	43	47	50	48	55	62	78

Rendement en azote nitrique : $rNO_3 = \dfrac{N_{NO_3} \text{ valeur mesurée}}{\text{N organique apporté par l'eau résiduaire}}$

Pour des temps courts, inférieurs à 5 semaines, le rendement en azote nitrique est d'autant plus faible que la température est plus basse, donc que l'azote ammoniacal persiste plus longtemps en quantité plus importante.

Pour des temps longs, supérieurs à 16 semaines, le rendement en azote nitrique varie peu, pour des températures comprises entre 0 et 10 °C. Il est voisin de 0,6, ce qui signifie que 40 p. 100 de l'azote organique minéralisable apporté par les eaux résiduaires échappe au processus de nitrification. A 28 °C, le rendement est plus élevé, voisin de 0,8, par suite de la persistance pendant un temps très court de l'azote ammoniacal, qui est la forme favorisant le maximum de perte pour la nitrification.

Dans la pratique, il n'y a pas lieu de s'attarder sur cette température qui n'est atteinte que très exceptionnellement dans les sols de champagne crayeuse (moyenne des maxima : 24,4 °C ; maximum absolu : 34,4 °C).

Le maximum calculé de concentration en azote ammoniacal varie peu avec la température : 43 microgrammes/gramme à 0 °C, 38 microgrammes/gramme à 10 °C et 37 microgrammes/gramme à 28 °C.

Contrairement aux données couramment admises, lorsque la température est basse, voisine de 0 °C, la nitrification n'est pas stoppée.

Le protocole ne permet pas de préciser si la fraction qui échappe à la nitrification est restée sous forme organique, ou si des pertes se produisent aux stades de l'ammonification ou de la dénitrification. Malgré la présence, dans des conditions relativement humides et à basse température, de carbone fermentescible il est peu probable que les pertes par dénitrification soient importantes.

4. — Conclusions

L'utilisation d'une technique d'incubation à différentes températures a permis de préciser le comportement, dans le sol, de l'azote organique apporté par les eaux résiduaires de féculerie.

La minéralisation extrêmement importante et rapide de l'azote organique, à l'origine des principales difficultés rencontrées à court terme, après un épandage de ces eaux, est due au pourcentage élevé d'azote organique protéique.

La décomposition des substances organiques commence à une température relativement basse, voisine de 0 degré. Elle se produira donc pendant la campagne d'épandage qui a lieu en automne ou au début de l'hiver, à une époque où la température du sol est comprise entre 0 et 10 °C.

En sol calcaire bien aéré, même pour des températures voisines de 0 degré, la teneur en azote ammoniacal est toujours très faible, de l'ordre de 2 à 5 microgrammes/gramme de sol sec. A ces températures, la vitesse d'ammonification devient supérieure à la vitesse de nitrification. Si le sol reçoit un épandage d'eau résiduaire de féculerie, l'azote ammoniacal produit va s'accumuler en quantité importante, pouvant atteindre 8 à 10 fois la teneur normale, soit des teneurs de l'ordre de 40 à 45 microgrammes/gramme.

Si le maximum de production d'azote ammoniacal varie peu avec la température, sa persistance est d'autant plus brève que la température est élevée.

L'analyse de la cinétique de minéralisation, suivant un modèle faisant intervenir 2 réactions successives du premier ordre, met en évidence 2 formes d'azote dont les vitesses de minéralisation sont différentes.

L'ajustement des valeurs expérimentales aux valeurs calculées montre que la totalité de l'azote organique apporté par l'eau résiduaire est minéralisée sous forme ammoniacale.

L'azote ammoniacal, qui persiste des temps plus ou moins longs suivant la température, provient, pour l'essentiel, de la forme rapidement minéralisable, dont la constante de vitesse d'ammonification varie avec la température en passant de — 0,60 à 0 °C à — 6,0 à 28 °C. La constante de vitesse d'ammonification de l'azote organique lentement minéralisable est très faible et varie peu avec la température (— 0,06 à 0 °C ; — 0,08 à 10 °C).

La nitrification de l'azote ammoniacal est partielle et seulement 2/3 de cet azote est nitrifié pour des températures comprises entre 0 et 25 °C. A 28 °C, la fraction d'azote qui nitrifie est plus élevée et représente environ les 4/5 de l'azote ammoniacal.

La quantité d'azote nitrique libérée par la minéralisation de l'azote organique de l'eau de féculerie atteint des valeurs extrêmement élevées après 6 mois d'incubation. Pour des températures comprises entre 0 et 10 °C et pour une eau contenant 600 milligrammes/litre d'azote et épandue à la dose de 80 millimètres, la production d'azote nitrique sera de 300 kilogrammes/hectare. A 28 °C, elle sera de 350 kilogrammes/hectare.

Dans ces conditions, on conçoit facilement que l'apport d'eau résiduaire provoquera un déséquilibre dans la composition de la solution du sol et un risque d'entraînement des nitrates en profondeur. Ces résultats expliquent une partie des difficultés rencontrées dans le contrôle de la nutrition azotée des céréales implantées sur des

parcelles venant de recevoir un tel épandage. Pour que les doses d'azote libéré par ces eaux restent dans les limites d'exigences des cultures, il faut que les doses épandues soient beaucoup plus faibles. La récupération des protéines, envisagée dans un proche avenir, diminuera la teneur en azote des eaux et laissera des formes beaucoup moins rapidement minéralisables.

L'utilisation de cette technique d'incubation, se déroulant en temps relativement court : 6 à 12 mois, devrait permettre de prédire le comportement d'une eau résiduaire dans le sol en ce qui concerne la fourniture d'azote minéral.

Dans le cas d'épandage d'eaux résiduaires de féculerie, nous avons comparé les quantités d'azote minéral calculées à partir des paramètres établis précédemment et les quantités d'azote minéral restant dans le sol à la sortie de l'hiver, pour une même période de temps, 16 semaines, temps moyen entre l'épandage et l'époque de détermination des reliquats d'azote nitrique.

Le rendement en azote nitrique d'une eau résiduaire contenant 900 milligrammes/litre d'azote, épandue à la dose de 80 millimètres, est de 55 p. 100 de l'azote total pour des températures comprises entre 0 et 10 °C. La fourniture d'azote minéral est donc de 400 kilogrammes/hectare.

Les reliquats d'azote nitrique, déterminés début mars 1976, dans des sols ayant reçu en moyenne un épandage de 80 à 100 millimètres, est de 430 kilogrammes/hectare, dont il faut défalquer 50 kilogrammes provenant de la minéralisation propre du sol. La quantité d'azote minéral libérée par l'eau résiduaire est donc de 380 kilogrammes/hectare.

La concordance de ces 2 valeurs vérifie la valeur prévisionnelle de cette méthode.

Cette comparaison est possible par suite de l'absence de pluies lessivantes pendant la période automne-hiver 1975-1976. Dans le cas général, il faudrait tenir compte de la vitesse de migration de l'azote nitrique, qui est fonction de la pluviosité de cette période.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Mineralization in chalk soil of the organic nitrogen contained in the waste waters of fecula works

The incubation at three different temperature (0°, 10° and 28 °C) and at a humidity rate corresponding to the equivalent humidity (25 p. 100 of the dry soil) allowed to precise the behaviour of the organic nitrogen supplied to a calcareous soil through the waste waters of fecula works.

The rapid and important production of mineral nitrogen is due to the high content of these waters in protein nitrogen. The decomposition of the organic substances begins at relatively low temperatures near to 0°. At this temperature the ammonification rate is higher than the nitrification one and the ammoniacal nitrogen increases in a large amount (40 to 45 μg/g), that is eight to ten times the normal content. The maximal production of ammoniacal nitrogen slightly varies according to temperature but its persistence in soil is the shorter as the temperature is higher.

The analysis of the kinetics of nitrogen mineralization reveals two nitrogen forms with different mineralization rates. The ammoniacal nitrogen comes mainly from the rapidly mineralizable form (constants of ammonification rate ranging between — 0.60 and — 6.0 for temperatures ranging between 0 and 20 °C). The nitrification of ammoniacal nitrogen is partial and the lower as temperature is low. 4/5 of the ammoniacal nitrogen is under nitric form at 28 °C and 2/3 only for temperatures varying between 0 and 10 °C.

The calculated amounts are of the same order as the amounts of mineral nitrogen detected in the top-layer (0-60 cm) of the soil at the end of winter 4 to 5 months after water scattering.

Zusammenfassung

Mineralisierung des organischen Stickstoffs der stärkefabrikabwässer in kreidehaltigem Boden

Die Inkubation bei drei verschiedenen Temperaturen (0°, 10° und 28 °C) und einer der äquivalenten Feuchtigkeit (25 p. 100 des trockenen Bodens) entsprechenden Feuchtigkeit erlaubte, das Verhalten des organischen Stickstoffs zu bestimmen, der mit den Stärkefabrikabwässern einem Kalkboden zugeführt wiad.

Die schnelle und bedeutende Erzeugung von Mineralstickstoff ist durch den hohen Gehalt and Eiweisstickstoff dieser Abwässer bedingt.

Die Zersetzung der organischen Substanzen beginnt mit ziemlich niedrigen an 0° grenzenden Temperaturen. Mit dieser Temperatur ist die Ammonifizierungsgeschwindigkeit höher als diese der Nitrifizierung und der Ammoniakstickstoff vermehrt sich in grosser Menge (40 zu 45 µg/g), das heisst achtbis zehnmal des normalen Gehalts. Die maximale Erzeugung von Ammoniakstickstoff ändert sich wenig mit der Temperatur, aber ihre Beständigkeit im Boden ist um so kürzer als die Temperatur höher ist.

Die Analyse der Stickstoffmineralisierung lässt zwei Stickstofformen erkennen, deren Mineralisierungsgeschwindigkeiten verschieden sind. Der Ammoniakstickstoff stammt im wesentlichen aus der rasch mineralisierbaren Form (Konstanten der Ammonifizierungsgeschwindigkeit, die für zwischen 0° und 20 °C einbezogenen Temperaturen zwischen — 0.60 und — 6.0 varieren). Die Nitrifizierung des Ammoniakstickstoffs erfolgt teilweise und um ist so geringer als die Temperatur niedrig ist. 4/5 des Ammoniakstickstoffs erscheint unter stickstoffhaltiger Form für eine Temperatur von 28 °C und nur 2/3 für Temperaturen zwischen 0 und 10 °C.

Die gerechneten Mengen sind von der selben Grössenordnung wie die Mengen von Mineral-Stickstoff, die in der oberen Schicht (0.60 cm) des Bodens am Ende des Winters, 4 bis 5 Monaten nach der Berieselung bestimmt worden sind.

Минерализация органического азота сточных вод крахмального завода в меловой почве.

Ж. К. МЮЛЛЕР.

Инкубация известковой почвы орошенной сточными водами крахмального завода, при трех температурах (0°, 10° и 28° Ц), и при влажности соответствующей эквивалентной (25 % сухой почвы), позволила уточнить поведение органического азота внесенного в нее этими водами.

Очень быстрая и крупная продукция минерального азота почвой вызывается высоким содержанием протеинного азота в этих водах.

Разложение органических веществ начинается уже при температурах сравнительно низких, приблизительно около нуля градусов. При этой температуре скорость аммонификации превышает быстроту нитрификации, и аммониачный азот накопляется в значительных количествах (от 40 до 45 µгр/гр), превышающих приблизительно в 8-10 раз нормальное его содержание. Максимальная продукция аммиачного азота меняется мало при повышении температуры, но его присутствие в почве настолько же кратковременно, насколько повышена температура.

Анализ кинетики минерализации азота выявляет присутствие двух его различных форм, скорость минерализации которых различна. Аммониачный азот получается главным образом из легко минерализующихся форм (постоянные скорости аммонификации от 0,60 до 6,0 при температурах от 0° до 20° Ц). Нитрификация этого азота только частична и настолько незначительна, насколько низка температура. При температуре в 28° Ц 4/5 аммониачного азота переходят в нитратную форму, а при температурах от 0° до 10° Ц нитрифицируются только 2/3 этого азота.

Рассчитанные количества представляют цифры приблизительно того-же порядка, что и количества минерального азота опредеявшиеся в поверхностном слое (0-60 см) почвы в период конца зимы, то-есть 4-5 месяцев после внесения удобрения.

Références bibliographiques

BREMNER M., KEENEY O. R., 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium nitrate and nitrite. *Analytica chimica Acta*, **32,** 485-495.

DOMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. *Ecologie microbienne du sol*, Masson Ed., Paris.

LEFÈVRE G., 1974. Deux années d'observations sur l'épandage par aspersion d'eaux résiduaires de féculerie sur sol de limon. *Ann. agron.*, **25** (2-3), 267-287.

LEFÈVRE G., 1975. Récupération agronomique de l'azote et du potassium des eaux résiduaires de féculerie. *Maîtrise de la pollution et valorisation des effluents et résidus dans l'industrie alimentaire.* Congrès A.P.R.I.A., Grenoble.

KNOWLES G. A., DOWING A. L., BARRET M. J., 1965. Détermination of kinetics constants for nitrifying bacteria in mixed culture with the aid of a electronic computer. *J. Gen. Microbiol.*, **38,** 263-278.

Mac LAREN A. D., 1969. Nitrification in sol. Systems approaching a steady state. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33,** 551-556.

MICHAELIS L., MENTEN M. L., 1913. Die Kinetick der Invertinwirkung. *Biochem. Zeits.*, **49**, 333-369.

MONOD J., 1942. *Recherches sur la croissance des cultures bactériennes*. Herman Ed. Paris.

MULLER J., 1974. Epandage des eaux de féculeries par aéroaspersion. Etude de leur composition ; incidences sur le sol et sur les eaux de la nappe. *Ann. Agron.*, **25** (2-3), 289-306.

Ann. agron., 1977, **28** (1), 113-115.

Chronique des livres

SMITCH L. P. — METHODS IN AGRICULTURAL METEOROLOGY. Developments in Atmospheric Sciences 3, Elsevier Ed., Amsterdam, 1975, 210 pp.

L'ouvrage présente d'une manière générale les fondements de la Météorologie Agricole. Le climat est un facteur de première importance en Agriculture, quel que soit le degré de perfectionnement atteint par les techniques agricoles.

L'auteur, Lionel P. Smith, est un agrométéorologiste de réputation mondiale, président de 1962 à 1971 de la Commission de Météorologie Agricole de l'Organisation Météorologique mondiale, membre permanent du Bureau britannique de Météorologie ; il s'est proposé, dans un souci d'utilité et d'efficacité, d'apporter des solutions pratiques et immédiates en réponse aux problèmes de la production alimentaire et de l'utilisation des terres.

Après une présentation de la Météorologie agricole, de ses publications scientifiques (un peu sommairement ramenée à la littérature nationale britannique, à la revue du même nom, et aux notes et congrès d'organismes internationaux, O.M.M., U.N.E.S.C.O., I.S.B.) et une description sommaire des différentes données climatiques à utiliser, l'auteur énumère et résume les différents secteurs de recherche où intervient le climat :

— Plantes : reproduction, croissance et maladies ;
— Animaux : reproduction, production et maladies ;
— Sols : travail du sol, drainage, fertilisation, mulch ;
— Techniques agricoles : irrigation, cultures protégées, ... ;
— Accidents climatiques : gelées, incendies, ...

Les exemples présentés illustrent la mise en pratique de la prévision et des actions les plus simples à entreprendre.

Le dernier chapitre, « rôle de la Météorologie agricole sur le marché », invite le chercheur, avec conviction et une touche d'humour, à ne pas se renfermer dans un microcosme spécifique, mais à rechercher à propager dans tous les publics, ses propres connaissances en en testant l'audience et l'utilité pratique.

Aux références bibliographiques citées dans chaque chapitre, s'ajoute en annexe, une liste sélectionnée des notes techniques de l'O.M.M. avec des résumés analytiques ainsi qu'une sélection des bibliographies annotées publiées à ce jour par Commonwealth Agricultural Bureaux (C.A.B.). Un index matière clôt l'ouvrage.

L'ouvrage, dans son ensemble est très classique et a le mérite de faire le point de 35 années de travaux d'une école de pensée britannique en Météorologie Agricole. Nous regrettons toutefois que la description physique du microclimat soit inexistante ; l'auteur ne cite que rarement les hypothèses et les équations de base, restant ainsi à un niveau trop général, ce qui est dommage. Le lecteur non averti ne risquera donc pas ainsi d'être handicapé par l'aspect théorique du problème « physique du milieu ».

L'ouvrage s'adresse à un large public et se situe à un niveau introductif.

Il peut ainsi servir de référence à des étudiants, des enseignants, des chercheurs mais également constituer une introduction pratique aux expérimentateurs, praticiens, conseillers techniques qui, bien que non spécialistes, peuvent être concernés par l'impact du climat dans la production alimentaire.

L. D. et M. C. D.

VAILLANT J. R. — UTILISATIONS ET PROMESSES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE. Collection du Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer, Eyrolles Ed., Paris, 1976, 366 pp.

L'énergie solaire est à l'ordre du jour. Elle est à l'origine de bien des polémiques, des enthousiasmes, des controverses et des idées erronées

L'héliotechnique est à ses débuts et ses pionniers sont méconnus et dispersés.

L'auteur, Ingénieur des Arts et Manufactures, Expert de la Coopération technique Internationale pour les problèmes des eaux et de l'énergie solaire, fait un large tour d'horizon des divers procédés de conversion de l'énergie solaire dans les domaines d'application à usage domestique, rural et industriel. Les aspects techniques et économiques sont examinés.

Plan de l'ouvrage :

— généralités sur l'énergie solaire, son origine, les rayonnements en cause, son utilisation, son stockage et sa place face à la crise mondiale de l'énergie,

— aperçu d'ensemble sur la captation, les différentes conversions : photothermique, photoélectrique, thermo-ionique, thermodynamique, photobiologique et chimique, les réalisations de centrales solaires et autres unités de transformation industrielle,

— utilisations domestiques de l'énergie solaire : chauffage, chauffe eau, climatisation, réfrigération, cuisson des aliments,

— aspects économiques et prévision de l'utilisation industrielle de l'énergie solaire, rentabilité, perspectives d'avenir,

— l'architecture solaire,

— utilisation et maîtrise des effets de l'énergie solaire dans l'espace urbain : connaissance et contrôle des microclimats urbains, confort visuel, thermique, ensoleillement, perspectives d'urbanisme solaire,

— futurologie : projets d'études et de recherches de l'avenir.

Une liste des quelques organismes d'information et de documentation, d'études ou de recherches s'intéressant particulièrement à l'énergie solaire, par pays, malheureusement sans adresse de résidence administrative, est fournie.

Une bibliographie restreinte et rédigée par thèmes, techniques ou applications permet d'aborder de façon raisonnable une littérature très vaste et parsemée.

Un index matière renvoie aux numéros des sous-chapitres traités.

L'ouvrage vient à point combler de façon efficace un domaine jusqu'ici assez pauvre dans la littérature de synthèse. On regrettera toutefois que la bioconversion soit abordée d'une manière trop rapide et trop superficielle.

Ce livre sera utilement à sa place dans bien des bibliothèques spécialisées, de l'écologie à l'optique appliquée ; c'est aussi un livre de chevet passionnant à compulser pour les amateurs écologistes.

L. D.

KINSELL L. COULSON. — SOLAR AND TERRESTRIAL RADIATION. METHODS AND MEASUREMENT. Academic Press, New-York, 1975, 322 p.

Le but primordial de l'ouvrage est de fournir un manuel de référence récent sur les méthodes et les instruments utilisables en radiométrie de routine au sol.

Le premier chapitre donne les définitions, unités, bases terminologiques et les lois du rayonnement de façon claire et brève ; il inclut un court rappel historique des études radiométriques, depuis les premiers travaux de Galilée (1611), en passant par Huyghens, Young, Fresnel, Stokes, Maxwell, Rayleigh, Angström ... et bien d'autres noms célèbres, ainsi qu'une liste chronologique des expérimentations originales de 1825 (premier actinomètre) à nos jours.

Pour chacun des chapitres suivants, l'auteur a eu le souci de faciliter l'utilisation de ce manuel en présentant systématiquement dans le chapitre, une étude théorique assez brève des phénomènes et des lois de base, puis les méthodologies disponibles et les instruments de routine. Ces chapitres présentent successivement :

— capteurs et sources de rayonnement,
— composante directe du rayonnement solaire,
— composante diffuse du rayonnement solaire,
— rayonnement ultraviolet du soleil et du ciel.

Suit le chapitre 6 qui traite des définitions, unités, terminologie et lois de photométrie. Puis :

— polarisation de la lumière dans l'atmosphère,
— durée d'insolation,
— constante solaire,
— rayonnement terrestre du sol et de l'atmosphère.

En annexe, suivent une liste des symboles utilisés, un tableau des distributions spectrales du rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère. Un index matière clôt l'ouvrage. Les références bibliographiques sont incorporées à chaque chapitre.

L'auteur a choisi une présentation simplifiée et concise, s'adressant prioritairement aux étudiants, à un niveau spécialisé, aux ingénieurs et chercheurs, du météorologiste à l'écologiste, de l'agronome

au biologiste. Nous regrettons l'absence d'un tableau de synthèse regroupant et comparant les performances instrumentales, travail difficile à réaliser mais qui aurait été très utile.

L'ouvrage est de présentation agréable, et de manipulation commode. Très complet, il mérite une place privilégiée dans bien des bibliothèques.

L. D.

NASYROV Yu S., SESTAK Z. — GENETIC ASPECTS OF PHOTOSYNTHESIS. Selected papers from the Symposium held on October 17-24, 1972, in Dushanbe, U.S.S.R., Junk W. Ed., The Hague, 1975, 392 pp.

Le symposium « aspects génétiques de la photosynthèse » a été organisé par l'Institut de Physiologie végétale et de Biophysique de l'Académie des Sciences Tajik et par l'Association N.I. Vavilov de Généticiens et Sélectionneurs ; il a réuni plus de 200 participants soviétiques et 14 invités originaires de République Démocratique Allemande, Australie, Danemark, Etats-Unis d'Amérique, Hongrie, et Tchécoslovaquie, appartenant aux spécialités suivantes : biochimie, cytologie, physiologie, génétique, biologie moléculaire et biophysique.

L'ouvrage reprend une large sélection des communications présentées, 34 articles sont regroupés en 6 sections :

— génome et originaire des chloroplastes,
— contrôle génétique de la biosynthèse dans les chloroplastes,
— contrôle génétique de l'assimilation du gaz carbonique par photosynthèse,
— nature génétique des mutations photosynthétiques et leur phénogénèse,
— modèles d'étude du mécanisme de la photosynthèse,
— bases génétiques de l'optimalisation de l'activité photosynthétique des plantes. Les conclusions du Symposium, présentées par Nasyrov, Kvitko et Sestak font le bilan des articles et des discussions.

Le lecteur trouvera dans l'ouvrage des index par auteur, sujet et plante, ainsi qu'une liste d'adresses de chercheurs soviétiques dans les disciplines concernées.

Malgré un retard de parution, l'ouvrage n'a rien perdu de son utilité ; il sera longtemps apprécié par l'originalité exceptionnelle du sujet et son sérieux ; c'est un outil précieux de réflexion et de référence, qui s'adresse aux chercheurs concernés par les bases génétiques et physiologiques de la production primaire.

L. D.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, desssins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 4-1977

Dépôt légal : 2e trimestre 1977. N° d'Impression : 24468

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1977

Vol. 28 . N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1977, **28** (2), 117-136.

Etude de la cinétique des phénomènes de dissolution en phase aqueuse. Application à la dissolution de l'atrazine

R. CALVET

avec la collaboration technique de Madame Anne-Marie TABAREAU

Station de Science du Sol, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

La dissolution de l'atrazine est étudiée dans différentes conditions expérimentales : en milieu liquide avec et sans agitation, en présence de gels d'argile. Les cinétiques de dissolution sont décrites à l'aide du formalisme de la diffusion moléculaire. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

— la vitesse de transfert des molécules de la phase solide dans la phase liquide ne peut pas toujours être obtenue à partir de la constante de vitesse déduite des mesures en phase liquide agitée ;

— cette vitesse de transfert peut être calculée à partir de la cinétique de dissolution en milieu non agité ;

— en phase liquide non agitée, la dissolution est déterminée à la fois par la vitesse de transfert et la diffusion moléculaire en temps court, par le transport dû à la convection libre en temps long ;

— en présence d'argile, la vitesse de transfert est environ 10 fois plus grande qu'en phase liquide. Dans ces conditions la dissolution est limitée par la diffusion moléculaire.

I. — Introduction

Les phénomènes de dissolution ont depuis longtemps retenu l'attention de nombreux chercheurs : pharmaciens, agronomes et pédologues notamment. En effet, les modalités du passage en phase liquide d'un médicament solide conditionnent son absorption par l'organisme et déterminent donc en partie son action thérapeutique. Ces phénomènes jouent également un rôle très important dans le sol où ils concourent à fixer la concentration de la solution du sol en éléments nutritifs et constituent souvent une étape essentielle dans le développement des chaînes de réactions chimiques responsables de l'altération des minéraux (Delmas, 1976).

La dissolution d'un composé est caractérisée par sa solubilité dans le milieu étudié et par la vitesse de passage dans la phase liquide. Si le premier paramètre peut être assez facilement déterminé, ce n'est pas le cas du second, car les cinétiques de dissolution conduisent à l'évaluation de grandeurs dont le sens physique n'apparaît pas toujours très clairement. Ceci est dû au fait que les paramètres accessibles à la

mesure sont déterminés par plusieurs phénomènes simultanés : réactions chimiques d'interface et phénomènes de transport dans le milieu de dissolution. Si l'un d'entre eux est dominant, la cinétique est assez simple à écrire ; par contre, s'ils contribuent tous également à la dissolution, il devient difficile d'interpréter les résultats donnés par les mesures. L'objet de cette publication est de proposer une description de la cinétique des phénomènes de dissolution, en particulier, dans les cas correspondant à cette dernière situation. Plusieurs conditions expérimentales sont analysées et les résultats obtenus sont utilisés pour interpréter les valeurs des paramètres caractérisant la dissolution de l'atrazine (2-chloro-4-éthylamino-6 isopropylamino-s triazine) dans différents milieux aqueux : eau, solutions acide et saline, gels d'argile.

II. — Etude expérimentale de la dissolution de l'atrazine

A. — *Matériel et méthodes*

L'atrazine utilisée est un produit technique à 94,1 p. 100 de pureté *. Les mesures de dissolution sont effectuées avec des pastilles de poudre comprimée (diamètre : 3,2 centimètres ; épaisseur : 0,3 centimètre). Les impuretés sont surtout constituées par la propazine (3 p. 100) et la simazine (1,5 p. 100). Nous avons fait l'hypothèse qu'elles étaient uniformément réparties dans la masse de telle sorte que 94,1 p. 100 de la surface des pastilles soit constituée par de l'atrazine. Ceci, joint à leur faible solubilité (propazine : 4,9 microgrammes/millilitre ; simazine : 5,4 microgrammes/millilitre ; atrazine : 30,5 microgrammes/millilitre), fait que l'analyse des solutions par spectrométrie UV ($\lambda = 222{,}3$ nanomètres) conduit à des résultats représentant essentiellement la dissolution de l'atrazine.

L'argile est une montmorillonite d'origine grecque. La fraction inférieure à 2 microns, saturée par Ca^{++} et sans sels libres sert à la préparation de gels à différentes teneurs en eau. Ces gels sont obtenus par centrifugation d'une suspension à des vitesses variables suivant l'hydratation désirée (les vitesses utilisées correspondent à des accélérations centrifuges variant de 18 000 à 40 000 g).

Il existe de très nombreux dispositifs expérimentaux permettant d'étudier les cinétiques de dissolution (Hersey, 1969). Parmi ceux-ci, notre choix s'est porté sur ceux dont l'utilisation paraissait la plus simple.

1. *Détermination des cinétiques de dissolution en milieu aqueux.*

Nous avons procédé à 2 types de mesures : avec et sans agitation mécanique de la phase aqueuse.

a) *Mesures avec agitation mécanique.*

La pastille d'atrazine, fixée sur un support en plastique, est mise au contact d'un volume connu d'eau distillée (200 centimètres cube). Cette eau est agitée par un barreau aimanté recouvert de téflon et la concentration est déterminée toutes les 30 minutes environ. Les détails du montage expérimental et de la manipulation ont été récemment publiés (Calvet *et al.*, 1975).

* Ce produit nous a été fourni par la société CIBA-GEIGY.

b) *Mesures sans agitation mécanique.*

La figure 1*a* représente la cellule de mesure utilisée. Le support de la pastille, monté sur une tige filetée, permet d'établir le contact entre l'eau et la pastille en évitant toute agitation du milieu. Pour les mesures, la cellule est immergée dans un bain thermostaté à 20 $\pm$ 0,5 °C. Au bout du temps désiré, la pastille est séparée de la phase aqueuse et celle-ci est analysée après agitation. Le volume d'eau utilisé est de 75 centimètres cube pour les temps de contact supérieurs à 10 minutes. Pour les temps inférieurs, les quantités dissoutes étant peu importantes, les mesures sont effectuées avec 10 centimètres cube pour avoir une concentration suffisante.

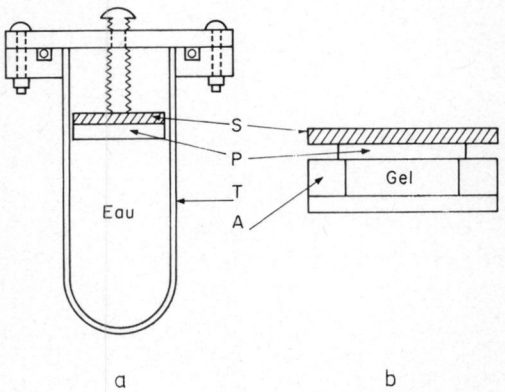


FIG. 1. — *Dispositifs expérimentaux utilisés pour l'étude des cinétiques de dissolution sans agitation mécanique*

a) *dissolution dans l'eau* ; b) *dissolution dans des gels d'argile.*

S = support en plastique ; P = pastille d'atrazine

T = tube ; A = anneau en plastique.

2. *Détermination des cinétiques de dissolution dans des gels d'argile.*

La figure 1*b* donne le dessin de la cellule de mesure. Le gel d'argile est contenu dans un anneau de plastique fermé à l'une de ses extrémités par un disque de plastique. Les cellules rendues étanches par un scellement à la paraffine sont aussi immergées dans un bain thermostaté à 20 $\pm$ 0,5 °C. Après des temps de contact donnés, la pastille est séparée du gel par glissement. L'atrazine contenue dans le gel est déterminée après 2 extractions avec une solution normale de $CaCl_2$. Dans ces conditions, il ne reste pas de composé organique adsorbé sur l'argile car l'adsorption est très faible (Calvet et Tercé, 1975).

B. — *Résultats expérimentaux*

Tous les résultats donnés dans cette publication sont les moyennes de 3 ou 5 mesures. Ceux de la dissolution dans l'eau avec agitation mécanique ont fait l'objet d'une précédente publication (Calvet *et al.*, 1975) d'où est tirée la courbe représentée sur la figure 2. Elle correspond à la cinétique de dissolution de l'atrazine à 20 °C.

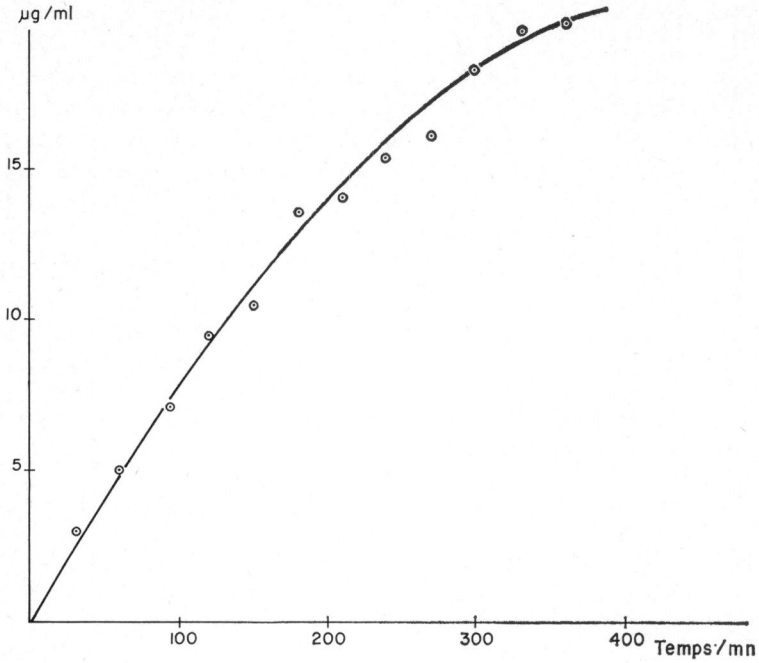


FIG. 2. — *Cinétique de dissolution de l'atrazine dans l'eau à* 20 °C, *avec agitation mécanique* (d'après Calvet *et al.*, 1975).

Sans agitation mécanique, les mesures ont été effectuées avec de l'eau distillée, une solution saline (KCl 1 N) et une solution acide (HCl, pH = 2). La figure 3 donne les variations de la quantité dissoute en fonction du temps et la figure 4, la courbe correspondant à la dissolution dans l'eau pendant les 15 premières minutes. Il apparaît que la cinétique suit des lois différentes selon la durée de la mesure : une 1re loi caractérisée par une variation non linéaire de la quantité dissoute en fonction du temps et valable pour les temps courts (inférieurs à environ 15-30 minutes) ; une 2e loi pour les temps longs, caractérisée par une variation linéaire de la quantité dissoute en fonction du temps.

La figure 5 montre un exemple de cinétique de dissolution dans un gel d'argile à 496 p. 100 d'eau (pourcentage exprimé en grammes d'eau pour 100 grammes d'argile séchée à 250 °C). Ici, la quantité dissoute suit une loi en $\sqrt{t}$. Ceci est observé quelle que soit la teneur en eau du gel.

III. — Etude théorique et discussion

Soit un solide plongé dans un liquide agité mécaniquement. La vitesse du fluide est une fonction de la distance à la surface du solide. Elle tend vers 0 en même temps que la valeur de cette distance, de telle sorte qu'au voisinage de la surface, le transport du soluté est essentiellement dû à la diffusion moléculaire, que loin de la surface, il est dû à la convection. Pour décrire la cinétique de dissolution, il est alors possible

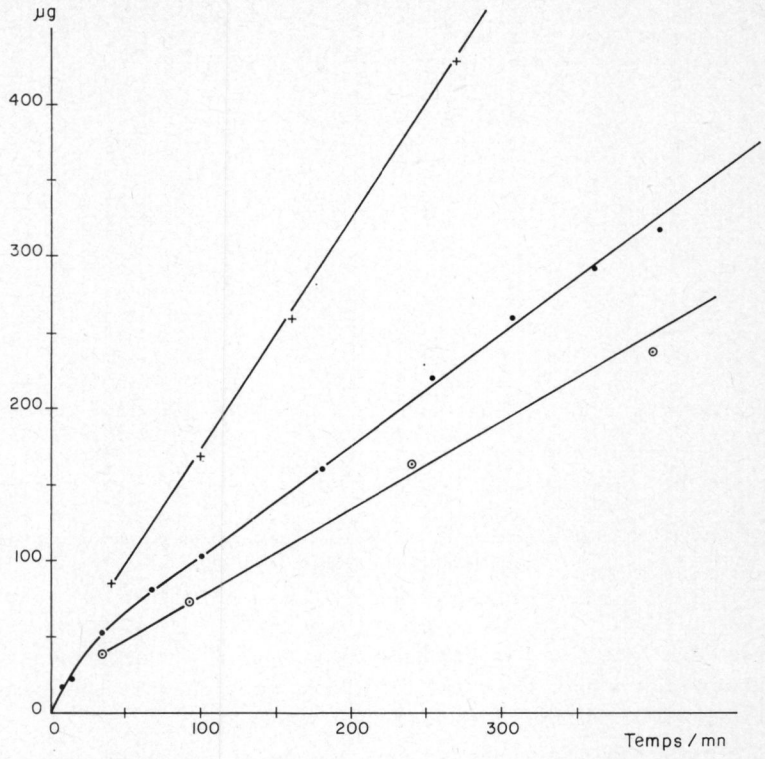


FIG. 3. — *Variation, en fonction du temps, de la quantité d'atrazine dissoute à partir d'une pastille sans agitation. Dissolution dans l'eau* (●), *dans une solution acide,* HCl pH = 2 (+), *dans une solution saline,* KCl N (⊙).

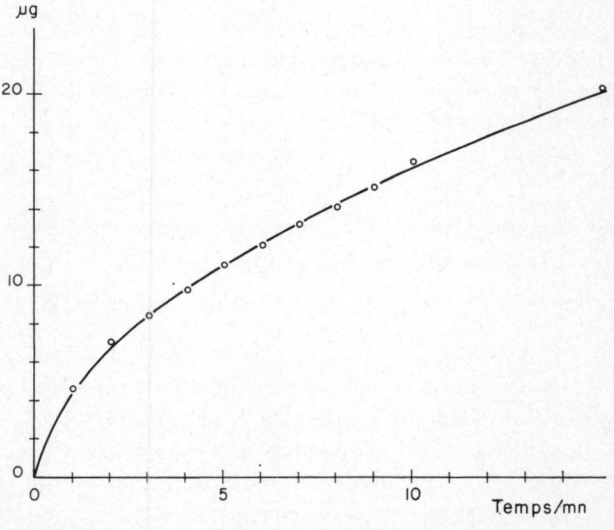


FIG. 4. — *Variation en fonction du temps de la quantité d'atrazine dissoute dans l'eau en l'absence d'agitation.*

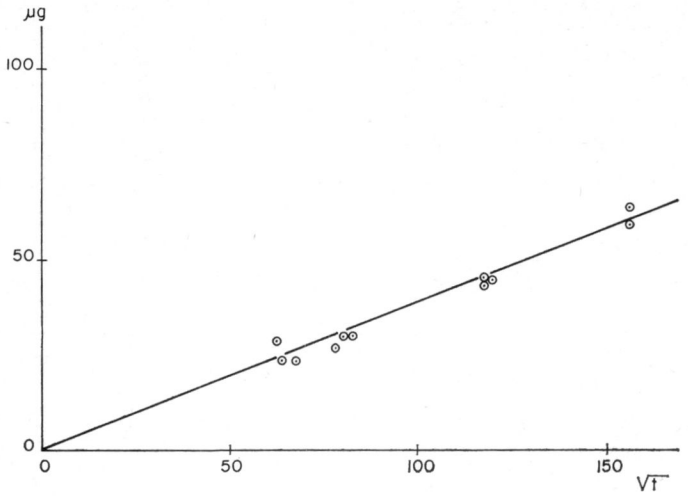


FIG. 5. — *Variation, en fonction de* $\sqrt{t}$, *de la quantité d'atrazine dissoute dans un gel de montmorillonite à* 496 p. 100 *d'eau.*

d'admettre l'existence d'un film immobile d'épaisseur R, variable suivant l'intensité de l'agitation mécanique. Dans ces conditions, nous pouvons considérer que la vitesse de dissolution est déterminée par 3 phénomènes :

1) le transfert des molécules (ou des ions) de la surface des cristaux, dans la phase liquide. Il est le résultat d'une réaction chimique d'interface entre le solvant et le solide ;

2) la diffusion moléculaire dans le film liquide immobile ;

3) l'entraînement par convection dans la masse du fluide.

Dans le cas où le premier phénomène est limitant, la cinétique de dissolution est celle de la réaction chimique, et sa description est relativement simple. Il n'en est plus ainsi lorsque les phénomènes de transport déterminent la vitesse de dissolution. Dans ce cas, plusieurs théories ont été proposées (réf. cit. in Bardet, 1967). Elles diffèrent par la nature du phénomène de transport pris en considération :

— diffusion moléculaire dans le film immobile : théorie de Nernst,

— écoulement turbulent seul : théorie de Kishinevski,

— diffusion moléculaire et écoulement turbulent : théorie de Higbie, de Danckwert et de Whitman.

Par contre, il n'existe pas de développement détaillé dans le cas d'une dissolution pour laquelle la réaction chimique d'interface et le transport dans la phase liquide jouent des rôles équivalents. C'est la situation que nous nous proposons de décrire. A cet effet, il est commode de distinguer, d'une part la dissolution dans un liquide agité mécaniquement, d'autre part la dissolution en l'absence d'agitation mécanique. Nous analyserons et discuterons successivement les points suivants :

A. Cinétique de dissolution avec agitation mécanique.

B. Cinétique de dissolution sans agitation mécanique.

1) Cinétique de dissolution en temps court,

2) — — — long.

C. Cinétique de dissolution dans des gels de montmorillonite.

A. — *Cinétique de dissolution avec agitation mécanique*

La description qui suit tient compte des 3 phénomènes précédemment définis. Elle est basée sur l'analyse de la diffusion moléculaire dans le film immobile, et perpendiculairement à la surface du solide (fig. 6). Le transfert dû à la réaction chimique d'interface et le mélange dans la phase liquide agitée sont utilisés pour définir les conditions aux limites.

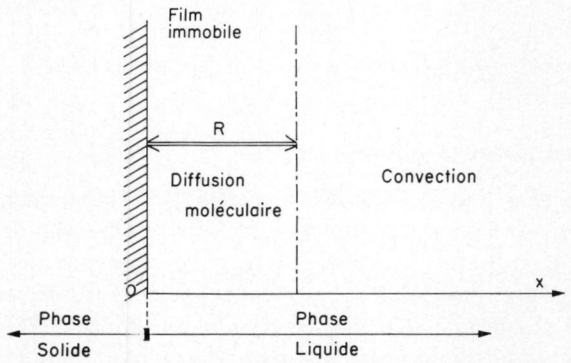


FIG. 6. — *Représentation schématique des différentes zones d'une phase liquide agitée au contact d'une phase solide.*

1. *Equation du phénomène ; conditions initiales et aux limites.*

En supposant que le coefficient de diffusion moléculaire est indépendant de la concentration, l'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (1)$$

où : D = coefficient de diffusion moléculaire
C = concentration dans le film immobile.

Cette équation est donc essentiellement valable pour les faibles concentrations comme c'est le cas notamment, pour la dissolution des composés peu solubles.

Le système étudié correspond aux conditions suivantes :

— Conditions initiales :

$$t = 0, \qquad x \geqslant 0, \qquad C = 0\,. \qquad (2)$$

— Conditions aux limites, $t > 0$.

• Pour $x = 0$, à la limite entre la phase solide et la phase liquide, le flux de diffusion moléculaire est égal au flux dû au transfert des molécules de la surface du

solide, dans le liquide. Ce dernier flux est proportionnel à une fonction, $f(C, C_0)$ de la solubilité C_0 et de la concentration C. Une expression simple de cette fonction est donnée par la relation (Delmon, 1969) :

$$f(C, C_0) = (C_0 - C)^n \tag{3}$$

où n est l'ordre de la réaction chimique de dissolution. Nous avons donc :

$$-D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} = \alpha(Co - C)^n \tag{4}$$

α étant une constante de proportionnalité.

• Pour $x = R$: à la limite entre le film liquide immobile et la phase liquide agitée, le flux de diffusion moléculaire est égal à l'augmentation de la quantité en solution. L étant l'épaisseur de la phase liquide agitée, C_m sa concentration, la condition s'écrit :

$$-D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=R} = L\frac{\partial C_m}{\partial t}. \tag{5}$$

Les relations (4) et (5) traduisent le fait qu'il n'y a pas de perte de soluté aux limites du film ($x = 0$ et $x = R$).

2. *Solution de l'équation différentielle.*

Il faut rechercher une solution de l'équation (1) répondant aux conditions (2), (4) et (5). Quand n est différent de l'unité, il n'existe pas de solution analytique. Nous étudierons donc le cas où $n = 1$, ce qui correspond à une réaction chimique d'interface du premier ordre. Bien qu'étant particulier, ce cas est intéressant car il correspond à un grand nombre de réactions de dissolution (Bardet, 1967). D'ailleurs, pour l'atrazine, nous avons observé un ordre apparent égal à l'unité (Calvet *et al.*, 1975). Nous verrons dans quelle mesure il peut correspondre à l'ordre vrai. La relation (4) s'écrit :

$$-D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} = \alpha(Co - C). \tag{6}$$

Dès lors, α a les dimensions d'une vitesse. Nous l'appellerons, la vitesse de transfert. Compte tenu de (6), la solution de l'équation (1) peut être obtenue en utilisant la transformation de Laplace (Carslaw et Jaeger, 1959). Elle s'écrit :

$$C(x, t) = $$

$$= Co\left\{1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2H(h + H)\,[h\cos\mu_i(R - x) - \mu_i \sin\mu_i(R - x)]\exp(-D\mu_i^2 t)}{\cos\mu_i R[2\mu_i^2(R + H + \tfrac{1}{2}) + R(\mu_i^2 + H^2)(\mu_i^2 + h^2) + hH]}\right\}$$

où $h = \dfrac{1}{L}$; $\quad H = \dfrac{\alpha}{D}$; $\quad \mu_i =$ solutions de l'équation :

$$\operatorname{tg}\mu_i R = \frac{hH - \mu_i^2}{\mu_i(h + H)}. \tag{7}$$

La concentration dans la phase liquide agitée est :

$$C_m = C(R, t) =$$

$$= Co\left\{1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2Hh(h + H)\exp(-D\mu_i^2 t)}{\operatorname{Cos}\mu_i R\,[2\mu_i^2(R + H + \tfrac{1}{2}) + R(\mu_i^2 + H^2)(\mu_i^2 + h^2) + hH]}\right\}. \tag{8}$$

C_m est la concentration mesurée lors de l'étude expérimentale de la cinétique de dissolution. L'analyse numérique de l'expression de C_m montre que la valeur de l'épaisseur R du film immobile joue un rôle particulièrement important.

Pour $R > 10^{-1}$ cm, il faut tenir compte de plusieurs termes dans la somme apparaissant dans la relation (8) et l'ordre apparent de la cinétique de dissolution est différent de l'unité.

Pour $R < 10^{-1}$ cm, par contre, les termes de la somme correspondant à $i > 1$ sont négligeables et la relation (8) s'écrit simplement :

$$C(R, t) = C_m = C_0[1 - A \exp(- D \mu_1^2 t)] \tag{9}$$

où A est une fonction de h, H et R. La vitesse de dissolution s'exprime alors par :

$$\frac{dC_m}{dt} = C_0 AD\mu_1^2 \exp(- D \mu_1^2 t) = D\mu_1^2(C_0 - C_m) . \tag{10}$$

Dans ces conditions, l'ordre apparent de la cinétique de dissolution est égal à l'unité et donc, est aussi égal à l'ordre de la réaction chimique d'interface.

Il est intéressant de comparer ces résultats au formalisme généralement utilisé pour décrire les cinétiques de dissolution. Quand l'ordre apparent de la réaction de dissolution est égal à 1, la variation de la concentration en fonction du temps peut être représentée par une relation du type proposé par Noyes et Whitney (réf. cit. in Bardet, 1967) :

$$\frac{dC}{dt} = k(C_0 - C_m) . \tag{11}$$

Compte tenu de (10) nous avons

$$k = D\mu_1^2 . \tag{12}$$

Les valeurs de $\mu_1 R$ étant très petites ($< \pi/36$), l'expression de μ_1^2 se déduit de (7) :

$$\text{tg } \mu_1 R \simeq \mu_1 R \qquad \text{d'où} \qquad \mu_1^2 = \frac{hH}{1 + R(h + H)} .$$

La constante de vitesse k est alors (avec $H = \alpha/D$) :

$$k = \frac{h\alpha}{1 + R(h + H)} . \tag{13}$$

La valeur de k est donc déterminée par

— la réaction chimique d'interface (α),
— la diffusion moléculaire dans le film immobile (D),
— l'épaisseur du film immobile (R),
— le volume de la phase liquide ($L \times 1$ cm^2).

Pour des valeurs données de k et D, cette relation n'est valable que pour certaines valeurs de R. En effet, nous pouvons écrire à partir de (13)

$$\alpha = \frac{k(D + Rh)}{hD - kR} . \tag{14}$$

La courbe $\alpha = f(R)$ est représentée dans la figure 7. Il apparaît que cette formule n'a de sens physique que pour

$$0 \leqslant R \leqslant \frac{hD}{k}.$$

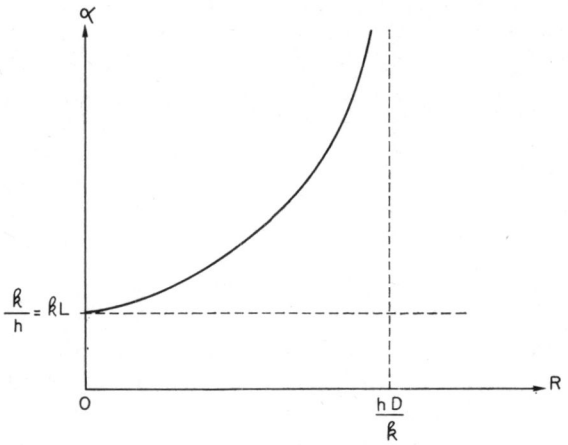


FIG. 7. — *Variation de la vitesse de transfert α en fonction de l'épaisseur du film immobile* R.

De plus, la valeur $\alpha = k/h = kL$ est une valeur minumum de la vitesse de transfert.

Dans le cas de la dissolution de l'atrazine dans l'eau à 20 °C, $k = 5.10^{-5}\ s^{-1}$ $D = 5.10^{-6}\ cm^2.s^{-1}$. Avec L = 21,3 cm, il vient :

$$0 \leqslant R \leqslant 4{,}69.10^{-3}\ cm. \qquad (15)$$

La limite supérieure de R peut être utilisée pour tester la cohérence des résultats donnés par d'autres méthodes de détermination de α qui doivent nécessairement conduire à une valeur de R satisfaisant cette condition.

3. *Signification physique de la constante de vitesse* k.

La relation (11) permet de déterminer la valeur de la constante k à partir de la courbe expérimentale $C_m = f(t)$ si la dissolution suit une cinétique d'ordre apparent égal à l'unité. Il importe alors de s'interroger sur le sens physique de cette constante dont le calcul n'implique pas l'existence d'un mécanisme physico-chimique particulier

a) *Importance relative de la réaction chimique d'interface et de la diffusion moléculaire.*

Elle peut être étudiée à partir de la relation (13) en la mettant sous la forme :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h}\left(\frac{1 + Rh}{\alpha} + \frac{R}{D}\right). \qquad (16)$$

Trois cas particuliers sont intéressants à noter :

1) $R = 0$

$k = \frac{\alpha}{L}$, valeur limite précédemment trouvée. Dans ce cas, la réaction chimique d'interface intervient seule.

$$2)\quad \frac{1+Rh}{\alpha} \ll \frac{R}{D}$$

$k \simeq \frac{D}{LR}$, la diffusion moléculaire contrôle la dissolution.

$$3)\quad \frac{1+Rh}{\alpha} \gg \frac{R}{D}$$

$k \simeq \frac{\alpha}{L+R}$, la réaction chimique d'interface contrôle la dissolution. Il faut noter que si la géométrie du milieu de dissolution est telle que R soit négligeable devant L, $k \simeq \alpha/L$ comme en 1. C'est le cas de nos mesures de dissolution de l'atrazine puisque $R < 10^{-1}$ cm et $L = 21{,}3$ cm. Il faut néanmoins noter que cette situation n'est pas toujours réalisée. En effet, dans les milieux poreux, L peut être du même ordre de grandeur que R dans les pores de faibles dimensions. Dans ces conditions, la constante de vitesse dépend de l'épaisseur de film immobile, sans pour autant dépendre de la diffusion moléculaire.

b) *Comparaison avec la relation de Noyes et Whiteney.*

Ces auteurs ont établi une loi de dissolution basée sur les hypothèses suivantes :

— l'ordre apparent de la cinétique de dissolution est égal à l'unité,

— la réaction chimique d'interface est suffisamment rapide pour que la concentration soit égale à la valeur limite C_0 près de la surface du solide,

— la diffusion moléculaire contrôle la dissolution,

— le gradient de concentration dans le film immobile est constant.

Les conditions aux limites (4) et (5) s'écrivent alors :

$$-D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} = -D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=R} = D\,\frac{C_0 - C_m}{R} = L\,\frac{\partial C_m}{\partial t}$$

d'où

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{D}{LR}\,(C_0 - C_m) = k(C_0 - C_m)\,.$$

C'est l'expression correspondant au cas 2 étudié précédemment.

c) *Expression de la constante de vitesse* k *en fonction du coefficient de diffusion moléculaire* D.

Différentes théories proposées pour décrire l'influence des phénomènes de transport conduisent à une relation de la forme (Bardet, 1967) :

$$k = GD^m\,. \qquad (17)$$

L'exposant m est nul quand la convection agit seule (théorie de Kishinevski) et est égal à 1 quand la diffusion moléculaire est dominante (théorie de Nersnt). Il prend des valeurs intermédiaires dans d'autres situations, notamment $\frac{2}{3}$ dans la théorie de Whiteman, et $\frac{1}{2}$ dans celles de Higbie et de Danckwert. Le traitement que nous avons

donné permet de rendre compte de ces observations. A partir de la relation (13) nous pouvons écrire :

$$\log k = \log h + \log \frac{\alpha D}{D + R(hD + \alpha)} = \log h + \log y .$$

La figure 8 représente les variations de log y en fonction de log D pour des valeurs extrêmes de R et α. Nous pouvons faire les constatations suivantes concernant la relation (17) :

— Les valeurs de m sont effectivement comprises entre 0 et 1. Quand la cinétique de dissolution n'est pas déterminée par la diffusion moléculaire, m est nul. C'est le cas lorsque la réaction chimique est très lente (α petit) ou lorsque les transferts par convection sont dominants (R très petit). Par contre, m prend une valeur égale à l'unité quand la diffusion moléculaire est limitante. Cela correspond à une réaction chimique très rapide (α grand) ou à un transfert par convection peu important (R grand). Pour les cas intermédiaires, m est une fonction croissante de α et R.

— La relation entre k et D n'est pas simple puisqu'elle dépend de α et R. Ceci montre qu'il n'est pas possible d'attribuer une signification univoque à une valeur donnée de l'exposant m.

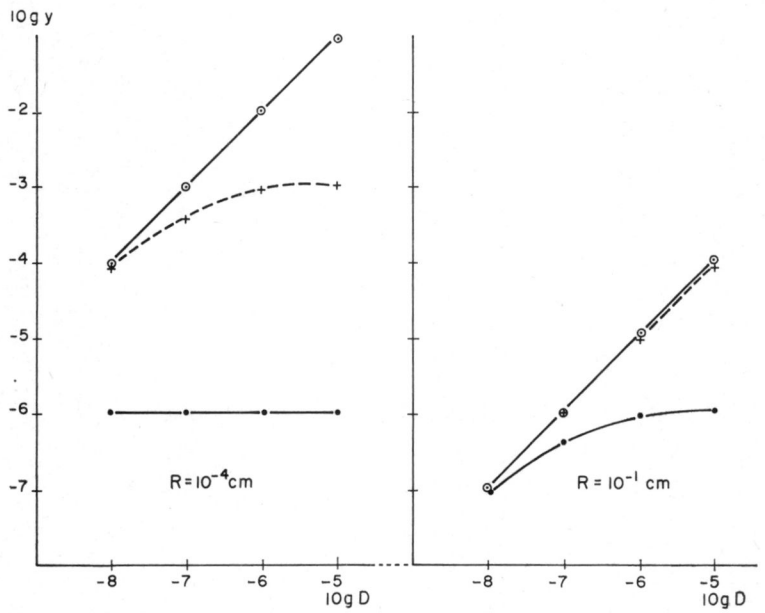


FIG. 8. — *Variation de* log *y en fonction de* log D :
⊙ : $\alpha = 1$ cm s^{-1} ; + : $\alpha = 10^{-3}$ cm s^{-1} ; ● : $\alpha = 10^{-6}$ cm s^{-1}

4. *Conclusion.*

Le développement théorique proposé montre que la constante de vitesse dépend :
— des caractéristiques de la réaction chimique d'interface (α),
— des caractéristiques de la diffusion moléculaire (D),
— de l'intensité de l'agitation mécanique (par l'épaisseur R du film immobile),
— du volume de solution au contact de la phase solide (L).

Il en résulte que la constante k ne peut pas être utilisée pour caractériser la dissolution d'un composé. Seule la vitesse de transfert α a un sens bien précis. Sa détermination est cependant difficile. En effet, dans le cas général, les cinétiques de dissolution avec agitation mécanique ne permettent pas une évaluation. Par contre, dans le cas où l'épaisseur du film immobile est nulle ou peut être considérée comme telle, l'expression de k est simple et permet le calcul de α par la relation

$$\alpha \simeq kL .$$

Si cette expression est utilisée quand R n'est pas nulle, le graphique 7 montre que α est alors sous-estimée.

B. — *Cinétique de dissolution sans agitation mécanique*

Rappelons que dans ce cas, la dissolution suit 2 cinétiques différentes (fig. 3) : l'une valable pour $t \leqslant 15\text{-}30$ minutes, l'autre valable pour $t > 30$ minutes.

1. *Cinétique de dissolution en temps court (fig. 4).*

En milieu non agité semi-infini dans la direction ox, les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

$$t = 0, \quad C = 0, \quad x > 0 \qquad (a)$$

$$t > 0, \quad -D\frac{\partial C}{\partial x} = \alpha(C_0 - C), \quad x = 0 \qquad (b) \qquad (18)$$

$$C = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad x \to \infty. \qquad (c)$$

La solution de l'équation de diffusion soumise aux conditions précédentes est (Carslaw et Jaeger, 1959) :

$$C(x, t) = C_0\left[\operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \exp(Hx + H^2 Dt)\operatorname{erfc}\left(H\sqrt{Dt} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right]$$

où $H = \dfrac{\alpha}{D}$ et $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$, erf z étant la fonction d'erreur. La quantité disssoute après un temps t est :

$$M(t) = \int_0^\infty C(x, t)\,dx = C_0\left[2\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} - \frac{1}{H}\left(1 - \exp(H\alpha t)\operatorname{erfc}\sqrt{H\alpha t}\right)\right]. \qquad (19)$$

La mesure donne :

$$Q(t) = A_S\, M(t) \qquad (20)$$

où A_S est la surface réelle de dissolution. La relation (20) contient 2 inconnues : A_S et α, le coefficient de diffusion moléculaire étant connu (Calvet, 1975). A_S et α peuvent alors être obtenues par un ajustement numérique à la courbe expérimentale $Q = f(t)$. Le calcul donne :

$$A_S = 9{,}4 \text{ cm}^2 \qquad (21)$$
$$\alpha = 1{,}23\ 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$$

La courbe théorique $Q' = f(t)$ calculée avec ces valeurs est représentée sur la figure 4. Elle coïncide très bien avec la courbe expérimentale.

La valeur de A_s est supérieure à la surface géométrique des pastilles qui est de 8 centimètres carré. Ces pastilles sont constituées par de la poudre comprimée et leurs surfaces présentent des irrégularités, d'où l'existence d'une surface de dissolution plus grande. Nous avons :

$$\text{surface réelle} = \text{surface géométrique} \times \beta \qquad \text{avec} \qquad \beta = \frac{9{,}4}{8}. \qquad (22)$$

Connaissant la valeur de α, il est maintenant possible d'utiliser la relation (13) pour calculer l'épaisseur du film immobile R :

$$R = \frac{D(\alpha - kL)}{k(D + \alpha L)} \qquad \text{soit} \qquad R = 6{,}3.10^{-4}\ \text{cm}.$$

(avec $k = 5.10^{-5}\ s^{-1}$; $D = 5.10^{-6}\ cm^2.s^{-1}$; $\alpha = 1{,}23.10^{-3}\ cm.s^{-1}$; $L = 21{,}3$ cm = longueur de milieu agité correspondant à 1 cm^2 de surface effective de dissolution pour les conditions expérimentales utilisées).

Cette valeur vérifie l'inégalité (15).

A titre de comparaison, citons 2 exemples de la valeur mesurée de l'épaisseur du film liquide immobile au contact d'une surface solide dans un milieu agité : 10^{-3} centimètres (Bunn et Emmett, 1949*) et $0{,}6.10^{-4}$ centimètres (Fage et Townend, 1932*).

L'examen des pastilles au microscope électronique à balayage montre que leur surface n'est pas uniformément plane. Elle présente de très nombreux trous de forme irrégulière dont la profondeur moyenne est de l'ordre de 4.10^{-4} centimètres. Il est donc possible que le film liquide immobile soit dû en grande partie aux irrégularités de la surface.

Connaissant la valeur de R, il est possible de calculer la valeur numérique des termes entrant dans l'expression de $\frac{1}{k}$ (relation (16)) :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h}\left(\frac{1 + Rh}{\alpha} + \frac{R}{D}\right) = \frac{1}{h}(813 + 126).$$

La dissolution de l'atrazine correspond donc au cas général où la constante de vitesse dépend à la fois de α et D.

2. *Cinétique de dissolution en temps long.*

Au-delà d'un temps compris entre 15 et 30 minutes, une autre loi détermine la cinétique de dissolution. Etant donné que la quantité dissoute Q est une fonction linéaire du temps, tout se passe comme si nous avions affaire à une diffusion dans un milieu semi-infini avec une source continue, d'où :

$$Q(t) = qt$$

où q est une constante. Cela signifie que le flux de molécules passant de la phase solide dans la phase liquide est constant. En conséquence, la relation 18 (*b*) n'est plus applicable.

Le fonctionnement de la pastille solide, comme une source continue, pourrait être la conséquence de modifications des propriétés physico-chimiques de l'interface solide-liquide. Il est cependant difficile d'en proposer une description précise. Par

* Réf. citée in Delmas, 1977.

contre, une autre explication peut être avancée en tenant compte d'un transport de masse dû à la convection libre. En effet, après un certain temps, la concentration au voisinage du solide atteint une valeur proche de la solubilité. Il se forme alors une couche légèrement plus dense que la masse liquide et un transport par convection libre prend naissance en raison des différences de densité.

Un cas semblable a été analysé par Wagner (1949) au cours de l'étude de la dissolution de plaquettes solides suspendues verticalement dans un liquide non agité. Pour décrire la cinétique de dissolution, cet auteur a procédé par analogie avec les phénomènes de transport de chaleur par convection libre. Ceci est en effet possible puisque la conduction de la chaleur et la diffusion moléculaire obéissent aux mêmes types d'équations différentielles. Dans le cas des mesures précédemment rapportées, il s'agit de la dissolution d'une plaque placée horizontalement dans un solvant non agité. En utilisant le formalisme relatif au transport de chaleur correspondant (Mac Adams, 1954) et en suivant le même raisonnement que Wagner, nous avons obtenu l'expression suivante :

$$q = 0{,}54 \frac{DC_s}{l} \left[\frac{l^3 g}{D\nu} \cdot \frac{|\Delta\rho|}{\rho} \right]^{1/4} \qquad (23)$$

où q = vitesse de dissolution
D = coefficient de diffusion moléculaire
C_s = solubilité
g = accélération due à la pesanteur ($9{,}81\ 10^2$ cm.s^{-2})
ν = viscosité cinématique de la solution saturée
ρ = densité du solvant
$\Delta\rho$ = excès par rapport à ρ de la densité de la solution saturée
l = côté du carré dont la surface est égale à celle de la plaquette utilisée (l = 3,07 centimètres).

L'application de la relation (23) à la dissolution de l'atrazine dans l'eau, dans une solution HCl à pH = 2 et dans une solution KCl normale (fig. 3) donne les valeurs indiquées dans le tableau 1. Celui-ci contient également les valeurs expérimentales de q et celles des paramètres utilisés pour le calcul.

TABLEAU 1

Valeurs calculées et expérimentales de la vitesse de dissolution

	D^* cm^2.s^{-1}	C_s g cm^{-3}	$\nu^{\ddagger}$ cm^2.s^{-1}	q (exp) g cm^{-2}.s^{-1}	q (calc) g cm^{-2}.s^{-1}
Eau	5.10^{-6}	3.10^{-5} (1)	10^{-2}	$1.3.10^{-9}$	$1.7.10^{-9}$
Solution HCl pH = 2..	$4.6.10^{-6}$	$4.41.10^{-5}$ (2)	10^{-2}	$2.6.10^{-9}$	$2.6.10^{-9}$
Solution KCL N.....	5.10^{-6}	$2.05.10^{-5}$ (3)	$0{,}93.10^{-2}$	$1.0.10^{-9}$	$1.1.10^{-9}$

* D'après Calvet (1975).
(1) D'après Calvet *et al.* (1975).
(2) Cette valeur est calculée à partir de la formule (Yamane et Green, 1972). :

$$\log \left[\frac{C_0}{C_s - C_0} \right] = \text{pH} - \text{pKa}$$

où C_0 est la solubilité dans l'eau. pKa = 1,67 (Ward et Weber, 1968).
(3) Valeur déterminée à partir des résultats de Hurle et Freed (1972).
‡ Nous avons pris la même valeur de la viscosité absolue μ pour tous les solvants utilisés (10^{-2} poise); rappelons que ν (viscosité cinématique) = μ/ρ.

Il existe un accord satisfaisant entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la vitesse de dissolution. Le transport de masse par convection libre et la diffusion moléculaire sont donc bien les facteurs contrôlant la cinétique de dissolution pour des temps supérieurs à 30 minutes.

En l'absence d'agitation mécanique, l'existence de deux phases successives est due à un changement des phénomènes limitant la dissolution. Il faut noter que la présence d'impuretés telles que la simazine ou la propazine ne peut pas rendre compte de ces observations. En effet, les solubilités (C_0) de ces deux composés sont beaucoup trop faibles (respectivement : 4,9 et 5,4 μg/ml) pour que l'application des relations (19) et (23) conduise à des valeurs en accord avec les résultats obtenus.

3. *Cinétique de dissolution dans des gels d'argile.*

C'est un cas particulier de la dissolution sans agitation mécanique. Ici, la cinétique est tout à fait différente de ce qu'elle est en milieu liquide : la quantité dissoute est une fonction linéaire de $\sqrt{t}$.

Les conditions initiales et aux limites données par les relations (18) sont toujours valables et la solution est donnée par (19). La linéarité observée en fonction de $\sqrt{t}$ impose que le terme :

$$\left[\frac{1}{H}\left(1 - \exp(H\alpha t)\ \operatorname{erfc}\sqrt{H\alpha t}\right)\right]$$

soit négligeable devant $2\sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$. Ainsi :

$$Q(t) = A_s\, M(t) = 2\, A_s\, C_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \qquad (24)$$

Ceci n'est possible que si le terme $H\alpha t = \frac{\alpha^2 t}{D}$ est grand. Nous en verrons les conséquences ultérieurement, quand les valeurs du coefficient de diffusion moléculaire dans les gels auront été déterminées.

La relation (24) montre que le système utilisé correspond à un milieu semi-infini où la concentration de surface reste constante (égale à C_0). Dans ces conditions, le coefficient D peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$D = \frac{\pi \rho^2}{4\, A_s^2\, C_0^2}$$

où ρ est la pente de la droite $Q(t) = f(\sqrt{t})$, A_s, la surface de la pastille au contact du gel multipliée par le coefficient correcteur β donné par (22), C_0, la quantité d'atrazine pouvant être solubilisée dans 1 centimètre cube de gel. Le tableau 2 donne les valeurs de C_0 et D correspondant aux différents gels de montmorillonite calcique.

Il faut remarquer que les coefficients D ainsi déterminés ne sont que des coefficients apparents, en raison, d'une part de l'adsorption de l'atrazine par l'argile, d'autre part du fait que le flux global est la somme d'une diffusion en phase adsorbée et d'une diffusion en phase liquide. Etant donné, cependant, que l'adsorption de l'atrazine sur une montmorillonite calcique est très faible (Vallet *et al.*, 1973 ; Calvet et Tercé, 1975), et que les mouvements des molécules adsorbées sont très lents, les coefficients mesurés représentent essentiellement la diffusion dans la solution du gel.

TABLEAU 2

Coefficient de diffusion de l'atrazine dans des gels d'argile

Teneur en eau des gels g d'eau/100 g d'argile séchée	C_0 * $\mu g/cm^3$ de gel	D $cm^2.s^{-1}$
496	38	$1.80.10^{-6}$
400	42	$1.20.10^{-6}$
293	45	$1.20.10^{-6}$
203	53	$0{,}60.10^{-6}$

* D'après Calvet et Tercé (1975).

Nous pouvons donc considérer que D est de l'ordre de grandeur de 10^{-6} $cm^2.s^{-1}$. Il apparaît alors qu'il faut $\alpha > 10^{-2}$ $cm.s^{-1}$ pour que le terme ($H\alpha t$) soit suffisamment grand afin que la relation (24) soit valable. En présence de l'argile, la vitesse de transfert α, caractérisant la réaction chimique d'interface, est donc au moins 10 fois plus grande que dans l'eau. Il en résulte que la concentration C_0 est très vite atteinte au niveau du contact pastille d'atrazine-gels. Dans ces conditions, la dissolution est limitée par la diffusion moléculaire dans les gels.

L'augmentation de la vitesse de transfert peut être attribuée à la polarisation des molécules d'eau situées près de la surface de l'argile. En effet, les molécules d'eau polarisées doivent probablement permettre une solvatation plus efficace des molécules d'atrazine, facilitant ainsi leur passage de la phase solide dans la phase liquide.

IV. — Conclusion

Les descriptions des phénomènes de dissolution que nous venons d'exposer, permettent de définir clairement le sens physique des paramètres mesurés dans le cas d'une cinétique du premier ordre. Il est ainsi possible de mettre en évidence les rôles respectifs de la réaction chimique d'interface et des phénomènes de transport ainsi que l'influence de l'agitation mécanique par son effet sur l'épaisseur du film liquide immobile.

Du point de vue méthodologique, cette étude montre que la nature des informations données par les mesures dépend des conditions expérimentales. Avec une agitation mécanique de la phase liquide, les résultats conduisent à l'évaluation de la constante de vitesse k. Il faut souligner que ce paramètre n'est valable que pour une situation expérimentale donnée, et qu'il ne représente pas du tout une caractéristique générale de la dissolution d'un solide. Rappelons en effet, que la constante k est une fonction de plusieurs variables : D, le coefficient de diffusion moléculaire ; α, la vitesse de transfert ; R, l'épaisseur du film liquide immobile, et V le volume de la solution. L'existence de ce dernier paramètre fait que la cinétique de dissolution d'un composé dépend de la géométrie du système utilisé. Il en résulte notamment que les phénomènes de dissolution dans des milieux poreux doivent dépendre très étroitement des propriétés géométriques de l'espace poral. La constante k n'apporte aucune indication physico-

chimique et ne constitue pas un paramètre prévisionnel sauf pour le système avec lequel elle a été déterminée. La variation de la quantité dissoute en fonction du temps avec l'agitation mécanique permet toutefois de déterminer l'ordre apparent de la dissolution. En particulier, nous avons montré que si cet ordre était égal à l'unité, la réaction chimique d'interface était du premier ordre. Il faut d'ailleurs souligner que ce cas ne correspond pas nécessairement à une dissolution limitée par la diffusion moléculaire comme la relation de Noyes et Whiteney pourrait le laisser supposer.

Le paramètre physico-chimique qui caractérise la dissolution est la vitesse de transfert (α) correspondant à la réaction chimique entre le solide et le solvant. La seule façon de la déterminer est de procéder à des mesures en l'absence d'agitation mécanique. Si le solide est placé au-dessus du solvant comme dans les expériences que nous avons rapportées, il importe d'étudier la cinétique en temps court pour éviter les perturbations dues au transport par convection libre.

Le formalisme que nous proposons n'est valable que pour les réactions chimiques d'interface du premier ordre. Le même type de développement est possible pour une valeur quelconque de l'ordre de la réaction. Dans ce cas, il faut faire appel à une résolution numérique des équations différentielles.

TABLEAU 3

Phénomènes limitant la dissolution de l'atrazine dans une phase aqueuse

Conditions expérimentales	Phénomène limitant
Milieu liquide agité	Diffusion moléculaire, réaction chimique d'interface. Le poids relatif des deux phénomènes dépend de l'épaisseur du film liquide immobile (R).
Milieu non agité	
Milieu liquide	
Temps court.....	Diffusion moléculaire, réaction chimique d'interface.
Temps long.....	Diffusion moléculaire, convection libre.
Gel d'argile.....	Diffusion moléculaire.

Les différentes situations étudiées dans le cas de l'atrazine sont rappelées dans le tableau 3. La cinétique de dissolution dans l'eau est à la fois déterminée par la réaction chimique d'interface et le transport dans la solution. Par contre, dans les gels de montmorillonite, elle est limitée par la diffusion moléculaire en raison de l'accroissement de la vitesse de transfert, dû, probablement, aux propriétés physico-chimiques de la surface de l'argile.

Summary

Kinetic study of dissolution phenomena in aqueous phases. Application to the dissolution of atrazine

The dissolution of atrazine is studied with different experimental conditions : in liquid with and without stirring and in clay gels. The kinetics of the dissolution are described with the formalism of the molecular diffusion. The main results are the following :

— the rate of transfert of the molecules from the solid phase to the liquide phase is not always obtained from the rate constante calculated with the measurements in stirred medium ;

— this rate of transfert can be calculated from the kinetics obtained in liquid medium without stirring ;

— in liquid phase without stirring the dissolution is determined both by the rate of transfert and the molecular diffusion in short time ; it is only limited by the rate of transfert due to free convection for long time ;

— with the clay gels, the rate of transfert is about of an order of magnitude greater than its value in liquid phase. In these conditions, the rate limiting step of the dissolution is the molecular diffusion.

Zusammenfassung

Untersuchung der kinetik der zersetzungsprozessen in wasserphase. Anwendung auf atrazinzersetzung

Atrazinzersetzung ist unter verschiedenen Versuchsbedingungen : in flüssiger Umwelt mit oder ohne Umrühren, in Anwesenheit von Tongelen studiert. Die Zersetzungskinetik ist mit Hilfe des Formalismus der Molekülverteilung beschrieben. Die erzielten Hauptergebnisse sind folgende :

— die Übertragungsgeschwindigkeit der Moleküle aus der soliden Phase in die flüssige Phase kann nichtimmer von der Geschwindigkeitskonstante aus errechnet werden, die aus in umgerührter flüssiger Phase gemachten Messungen abgeleitet ist ;

— diese Übertragungsgeschwindigkeit kann aus der Zersetzungskinetik in ungerührter Umwelt errechnet werden ;

— in nicht gerührter flüssiger Phase ist die Zersetzung kurzfristig zugleich von der Übertragungsgeschwindigkeit und Molekülverteilung und langfristig vom durch freie Konvexion bedingten Transport bestimmt ;

— in Tonanwesenheit ist die Übertragungsgeschwindigkeit ungefähr zehnmal grösser als in flüssiger Phase. Unter diesen Bedingungen ist die Zersetzung duach die Molekülverteilung begrenzt.

РЕЗЮМЕ

Изучение кинетики явлений растворения в водной фазе. — Применение к растворению атразина.

Р. КАЛЬВЕ.

Растворение атразина изучалось в разных экспериментальных условиях : в жидкой среде со встряхиванием и без такового, и в присутствии глинистых гелей. Кинетики растворения описываются с помощью формализма молекулярного рассеяния. Получены были следующие главные результаты :

— скорость перемещения молекул твердой фазы в фазу жидкую не всегда можно получить исходя от постоянной скорости измеренной в жидкой фазе при встряхивании;

— скорость эту можно вычислить на базе кинетики растворения в не встряхиваемой среде;
— в жидкой фазе без встряхивания, растворение определяется одновременно при помощи скорости переноса и молекулярного рассеяния за короткое время, и переноса вызванного свободной конвекцией в течении долгого времени;
— в присутствии глины, скорость перемещения превышает приблизительно в 10 раз скорость перемещения в жидкой фазе. В этих условиях растворение ограничивается молекулярным рассеянием.

Références bibliographiques

BARDET L., 1967. Facteurs physico-chimiques influençant la mise en solution des médicaments. *J. Mond. Pharm.*, **3,** 203-236.

CALVET R., 1975. Mesure rapide du coefficient de diffusion de l'atrazine en solution aqueuse. *Weed Research*, **16**, 53-55.

CALVET R., TERCÉ M., 1975. Solubilité de l'atrazine dans des gels de montmorillonite calcique. *C. R. Acad. Sci.*, **281**, 247-248.

CALVET R., TERCÉ M., LE RENARD J., 1975. Cinétique de dissolution dans l'eau de l'atrazine, de la propazine et de la simazine. *Weed Research*, **15,** 351-356.

CARSLAW H. S., JAEGER J. C., 1959. *Conduction of heat.* 2e édition. Clarendon Press, Oxford.

DELMON B., 1969. *Introduction à la cinétique hétérogène.* Edition Technip, Paris, 695 p.

DELMAS A. B., 1977. Etude expérimentale des phénomènes de dissolution ($SrSO_4$). Application à l'analyse cinétique des mécanismes de l'altération des silicates. Thèse Université Paris 6.

HERSEY J. A., 1969. Methods available for the determination of *in vitro* dissolution rate. *Manufacturing chemist and aerosol news.* February, 32-35.

HURLE K. B., FREED V. H., 1972. Effect of electrolytes on the solubility of some 1-3-5 triazines and substituted ureas and their adsorption on soil. *Weed Research*, **12,** 1-10.

MAC ADAMS W. H., 1954. *Heat transmission.* MacGraw-Hill. New York., 532 p.

VALLET M., CALVET R., CHAUSSIDON J., 1973. Remarques complémentaires sur l'adsorption de l'atrazine par les montmorillonites. *Proc. Eur. Weed. Res. Coun. Symp. Herbicides-soil.* Versailles, 41-51.

WAGNER C., 1949. The dissolution rate of sodium chloride with diffusion and natural convection as rate-determining factors. *J. Phys. Chem.*, **53,** 1030-1033.

WARD T. M., WEBER J. B., 1968. Aqueous solubility of ethylamino-s-triazines as a function of pH and molecular structure. *J. of Agric. and Food chem.*, **16** (6), 959-961.

YAMANE V. K., GREEN R. E., 1972. Adsorption of ametryne and atrazine on an oxisol montmorillonite and charcoal in relation to pH and solubility effects. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36,** 58-64.

Ann. agron., 1977, **28** (2), 137-157.

Etude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier

Ch. VALANCOGNE et F. A. DAUDET

avec la collaboration technique de A. FOUÉRÉ

Laboratoire de la Chaire de Bioclimatologie et d'Ecologie de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, I.N.R.A., 16, *rue Claude-Bernard* 75231 *Paris Cedex* 05

Résumé

L'utilisation de micropsychromètres à effet Peltier et de tensiomètres a permis l'étude des variations de potentiel matriciel du sol sous une culture de maïs dans l'espace et dans le temps (fig. 1 et 2).

Malgré les précautions prises à la suite de travaux antérieurs, une oscillation journalière du potentiel pouvant atteindre 4 bars (fig. 3) se manifeste qui ne peut être attribuée ni à des effets thermiques, ni seulement à une variation de teneur en eau consécutive à l'évapotranspiration. L'évolution du potentiel aux différentes profondeurs (fig. 4) au cours d'un été, a mis en évidence l'existence de remontées d'eau capillaires de la profondeur vers les zones desséchées par la culture. Une grande variabilité horizontale a été constatée provenant en partie de l'hétérogénéité introduite par la culture en ligne du maïs, et de la distribution aléatoire des racines. Une bonne description du « climat hydrique » dans le sol implique donc plusieurs mesures.

Des mesures simultanées de l'humidité volumique par la méthode neutronique ont permis d'observer la relation existant entre le potentiel et l'humidité. Aucun effet d'hystérésis significatif n'a pu être mis en évidence (fig. 6 et 7), mais il apparaît que l'extrapolation au terrain des relations potentiel-humidité établies en laboratoire sur des prélèvements de sol (fig. 6*a*, 6*b*) doit être faite avec prudence, d'où l'intérêt de disposer de techniques de mesure directe du potentiel matriciel et de l'humidité.

En annexe est présenté le système d'acquisition de données conçu pour traiter directement sur ordinateur les données psychrométriques nécessaires au calcul du potentiel matriciel (fig. 8 et 9).

I. — Introduction

Le potentiel hydrique est une donnée fondamentale car il caractérise l'état de sécheresse d'un milieu.

L'activité physiologique des plantes se réduit progressivement lorsque l'état de sécheresse des tissus augmente. L'intensité des transferts d'eau dans le sol, du sol vers la plante dépend des gradients de potentiel sur le trajet de l'eau, d'où l'intérêt de décrire la distribution spatiale et la variation dans le temps du potentiel hydrique du sol.

Une première étude méthodologique réalisée en 1973 a montré qu'il est possible de mesurer le potentiel hydrique du sol dans tous le domaine de variation résultant du dessèchement par les cultures, au moyen de micropsychromètres à effet Peltier (Valancogne et Daudet, 1974). L'utilisation *in situ* de cette méthode connue depuis déjà longtemps (Spanner, 1951) n'a pas fait, dans le monde, l'objet de beaucoup de publications. On pouvait donc craindre l'existence de difficultés insurmontables.

L'existence d'une forte fluctuation journalière est en effet apparue, mais il s'est avéré qu'une part importante de celle-ci traduisait un effet du gradient de température dans le sol. Une mise en place horizontale du micropsychromètre permettait de réduire considérablement cet effet.

En outre, l'emploi de plusieurs psychromètres placés à une même profondeur nous a montré la grande hétérogénéité de la distribution du potentiel. Par conséquent, de nombreuses mesures sont nécessaires, ce qui rend souhaitable l'automatisation des mesures en sorte que leur traitement puisse être fait directement sur ordinateur.

Les micropsychromètres à effet Peltier sont apparus comme un complément indispensable des tensiomètres. Ces derniers en effet se désamorcent pour des potentiels hydriques faibles (inférieurs à — 0,8 bar), mais dans leur domaine de fonctionnement ils sont beaucoup plus précis que les micropsychromètres.

Après cette étude, nous nous sommes donc proposés de passer à l'exploitation en routine des micropsychromètres à effet Peltier afin de décrire les variations de potentiel sous une culture de maïs. Un système automatique avec enregistrement numérique sur ruban perforé a été construit afin de traiter rapidement sur un ordinateur la masse de données recueillies.

Comme il est assez facile également d'enregistrer les informations tensiométriques, le potentiel hydrique est donc désormais une grandeur dont l'évolution au cours du temps peut être suivie quelle que soit la gamme considérée.

Les mesures d'humidité sont par contre toujours délicates et leur automatisation n'est guère possible. La question se pose donc d'utiliser les mesures de potentiel pour suivre aussi finement que possible le bilan hydrique au cours du temps, à l'aide de la relation potentiel matriciel-humidité. Sur de longues périodes, l'existence d'un phénomène d'hystérésis peut rendre difficile la transposition indiquée. Mais sur des intervalles de temps de l'ordre de quelques jours (sauf cas d'infiltration d'eau importante à la suite d'une pluie ou d'un arrosage), on peut sans doute l'appliquer sans grand risque.

Dans l'étude que nous présentons ici, des mesures d'humidité du sol ont été effectuées régulièrement au cours de la saison et la relation potentiel-humidité du sol peut ainsi être déterminée expérimentalement *in situ* ; or cette relation apparaît très différente de celle établie en laboratoire. Ce résultat qui sera plus particulièrement abordé dans la discussion, souligne encore l'intérêt des mesures directes de potentiel.

II. — Matériel et méthode

L'étude menée durant l'été et l'automne 1974, sur une culture de maïs non irriguée en sol de limon profond à la Minière près de Versailles, a consisté à mesurer le potentiel ψm par les méthodes psychrométriques et tensiométriques, et l'humidité par la méthode neutronique.

2.1. — *Mesures psychrométriques*

Cette méthode consiste à mesurer l'humidité et la température de l'air en équilibre avec l'eau du sol, d'où l'on déduit directement le potentiel matriciel ψm, sous réserve que le potentiel osmotique soit négligeable.

Le capteur employé, son fonctionnement et un système automatique avec enregistrement analogique ont été décrits précédemment (Valancogne et Daudet, 1974). Ce dernier a été modifié pour sortir les résultats sous forme numérique afin de faire un traitement direct sur ordinateur (cf. Annexe).

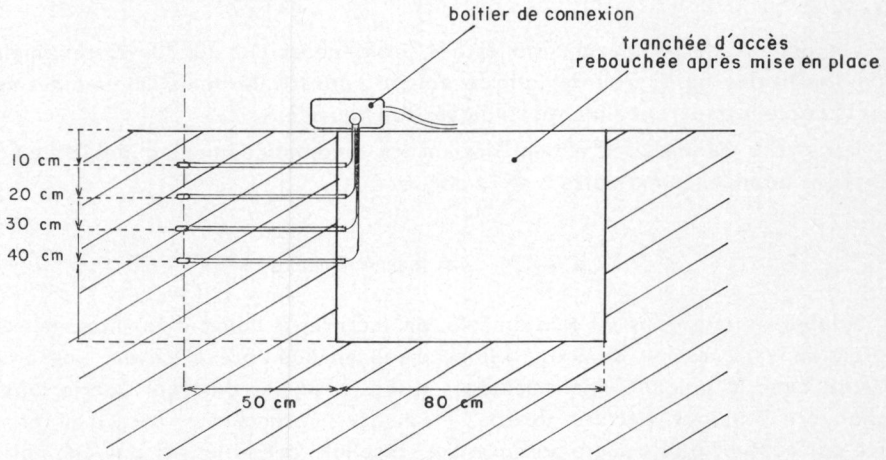


FIG. 1. — *Installation dans le sol des micropsychromètres à effet Peltier.*

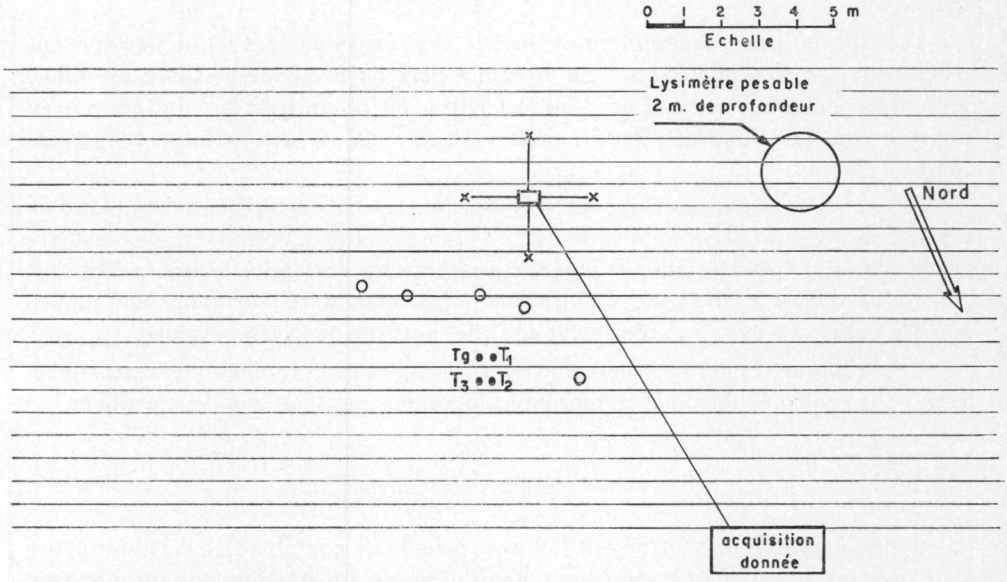


FIG. 2. — *Plan du dispositif expérimental : les lignes horizontales de la figure représentent les lignes de maïs.*

× micropsychromètres,
● tensiomètres,
o tubes d'accès pour les mesures neutroniques.

Les micropsychromètres à effet Peltier ont été fixés au bout de cannes en PVC de 50 centimètres de long. Compte tenu de l'étude précédente déjà citée (1974), la disposition horizontale a été adoptée afin de minimiser les effets des gradients de température. La mise en place a été effectuée à partir d'une tranchée dans des trous d'accès forés aux dimensions des capteurs. Ce procédé permet de réduire les perturbations et les anomalies qui pourraient en résulter dans la distribution de racines. L'observation du système racinaire et du sol lors de l'enlèvement des capteurs a permis de vérifier l'absence de prolifération racinaire anormale qui aurait pu fausser la description de la distribution du potentiel que nous nous étions proposés de faire.

Les psychromètres furent installés à 4 profondeurs (10, 20, 30, 40 centimètres) selon 4 verticales (fig. 1), 2 sur la ligne de maïs, et 2 dans l'interligne. Les emplacements dans la parcelle expérimentale sont indiqués à la figure 2.

Les cycles de mesures étaient déclenchés automatiquement à des fréquences comprises habituellement entre 6 et 12 par jour.

2.2. — *Mesures tensiométriques*

Rappelons que dans un tensiomètre, on mesure, à l'aide d'un manomètre, la dépression qui s'installe dans un volume d'eau en équilibre à travers une bougie poreuse avec le potentiel matriciel du sol. Les systèmes diffèrent par le type de manomètre employé (lecture directe, électrique, enregistreur, etc...) et par sa place par rapport à la bougie poreuse. Les résultats présentés ici ont été obtenus par lecture directe sur des tensiomètres commercialisés, munis d'un manomètre Bourdon.

Le dispositif expérimental tensiométrique était constitué de 4 tensiomètres à lecture directe, 2 à 80 centimètres et 2 à 90 centimètres de profondeur, situés au milieu de 2 interlignes de la culture de maïs, à environ 30 centimètres les uns des autres, comme indiqué à la figure 2. Dans la mesure du possible, les lectures étaient effectuées une fois par jour.

En outre, nous avons essayé un système d'enregistrement grâce à l'emploi d'un capteur de pression placé au niveau de la bougie poreuse. Ces données peuvent être particulièrement utiles lorsque le potentiel présente des variations brusques à la suite d'une pluie ou d'une irrigation. Ce dispositif présente en outre l'avantage que, supprimant la colonne d'eau, on s'affranchit de l'effet parasite de la température.

Ces tensiomètres enregistreurs, mis en service plus tard, furent utilisés essentiellement pour contrôler certaines observations faites avec les tensiomètres classiques.

2.3. — *Mesures neutroniques*

Un humidimètre à neutron HP 310 avec échelle de comptage ECP 310 fut utilisé pour mesurer l'humidité du sol. Cinq tubes d'accès de 2 mètres de long permettaient des mesures jusqu'à 1,65 mètre de profondeur : trois dans l'interligne et deux sur la ligne (cf. fig. 2). Les comptages neutroniques étaient effectués de 10 centimètres en 10 centimètres (Daudet et Valancogne, 1976).

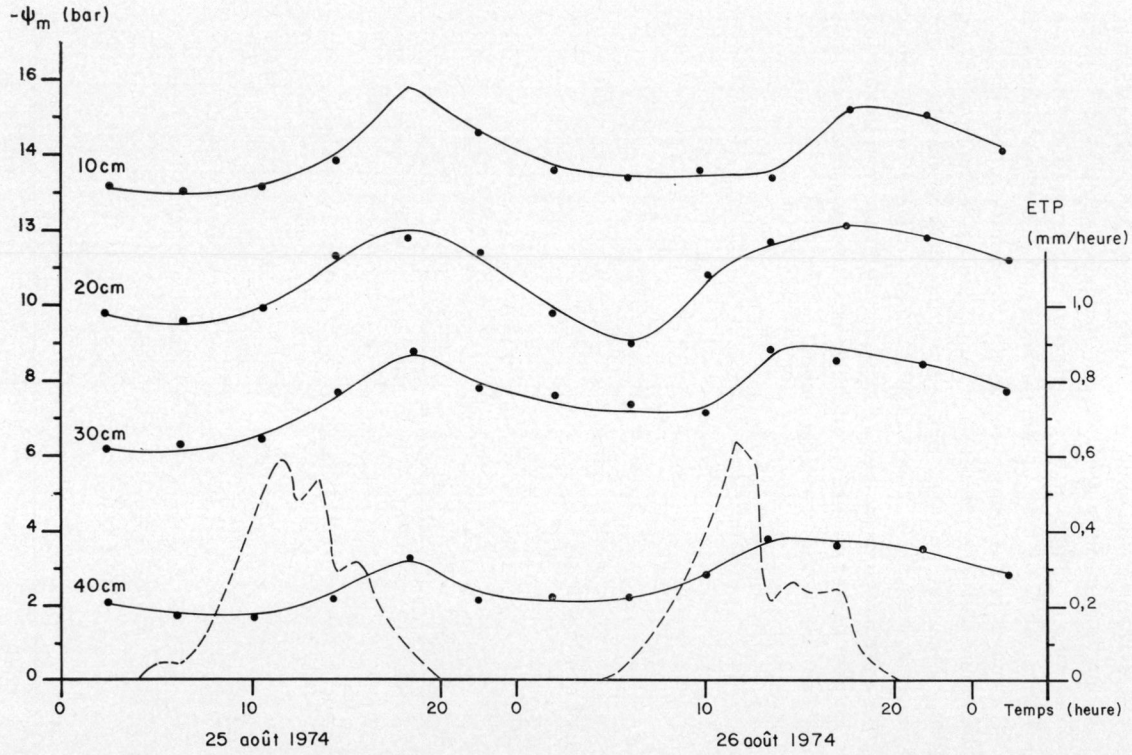


FIG. 3. — *Variations journalières du potentiel mesuré à l'aide de micropsychromètres à effet Peltier à différentes profondeurs dans la zone racinaire.*

III. — Résultats

3.1. — *Variations journalières du potentiel matriciel*

Les mesures psychrométriques font apparaître une variation périodique pratiquement synchrone quelle que soit la profondeur. Quelques exemples sont rapportés sur la figure 3. On soulignera l'importance de cette amplitude journalière qui peut parfois atteindre 3 à 4 bars (soit 3.10^3 à 4.10^3 centimètres d'eau). La valeur absolue du potentiel croît de 9-12 heures jusque dans la soirée et diminue au cours de la nuit.

Aux profondeurs plus importantes où étaient implantés les tensiomètres, quelques contrôles durant certaines journées ont indiqué une légère variation journalière, d'amplitude pouvant atteindre 0,02 bar. Ce phénomène n'ayant pas été retrouvé avec les tensiomètres enregistreurs équipés de capteurs de pression installés aux mêmes profondeurs, on peut penser qu'il résultait d'une action des variations de température sur la colonne d'eau des tensiomètres classiques.

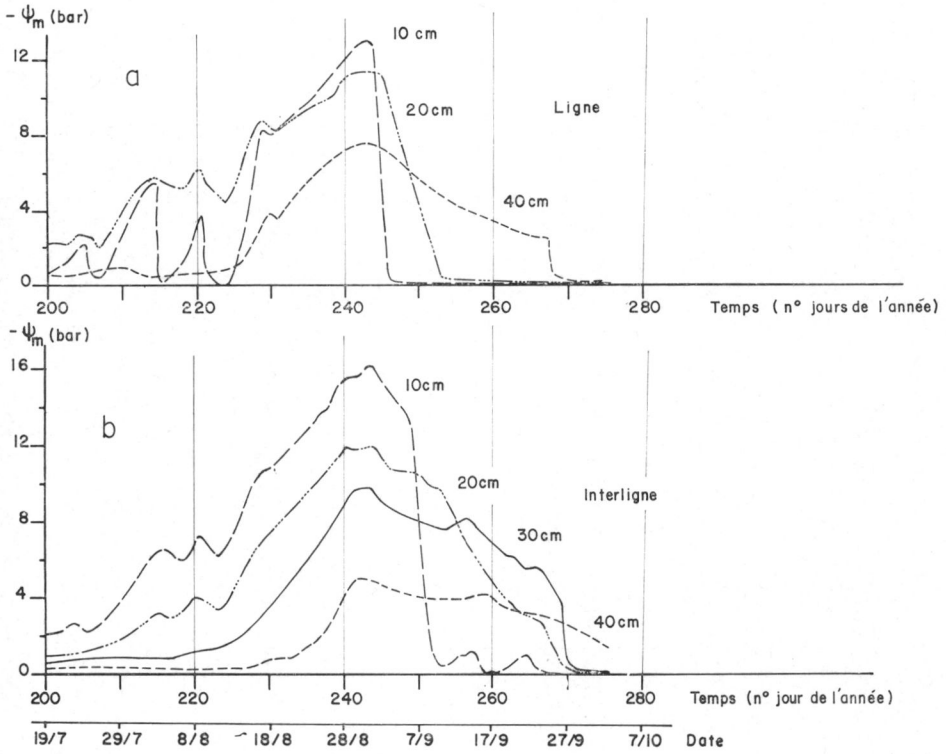
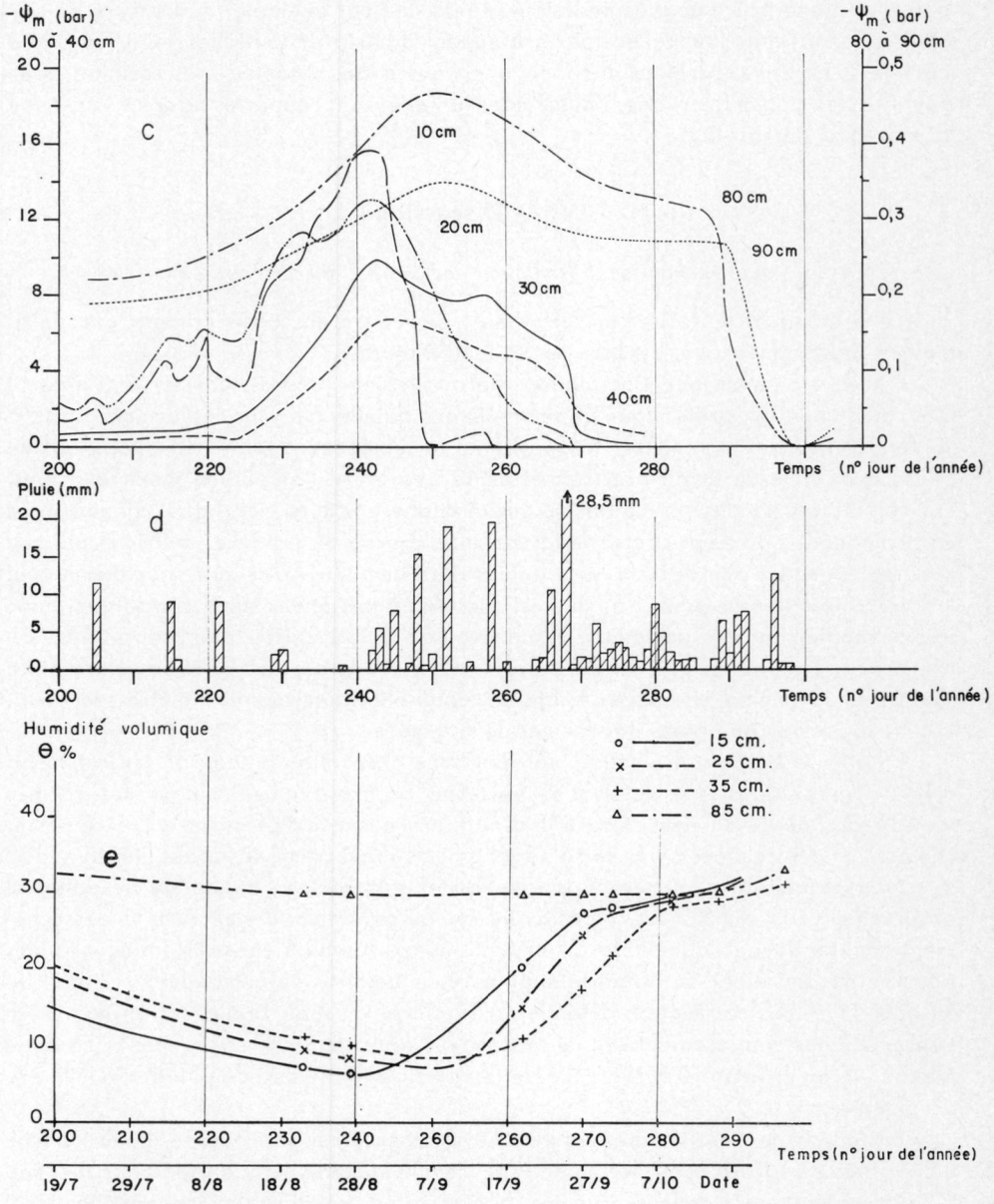


FIG. 4. — *Variations dans le temps et en fonction de la profondeur*

a) potentiel matriciel dans la ligne,
b) potentiel matriciel dans l'interligne,



du potentiel matriciel, de l'humidité et de la pluviométrie :

c) potentiel matriciel moyen (lignes et interlignes),
d) pluviométrie,
e) humidité volumique.

3.2. — *Variations saisonnières du potentiel matriciel*

Pour mettre en évidence les variations saisonnières du potentiel, il faut éliminer les variations journalières citées précédemment, soit en ne conservant que les valeurs mesurées à une heure donnée de la journée (la nuit par exemple), soit encore en calculant une moyenne journalière par profondeur à partir de toutes les mesures d'une journée. C'est cette dernière méthode que nous avons adoptée ; les résultats pour 2 profils, l'un dans l'interligne, l'autre dans la ligne, sont rapportés figure 4, ainsi que la moyenne des profils.

IV. — Discussion

4.1. — *Interprétation de l'oscillation journalière du potentiel matriciel*

Le premier facteur que l'on serait tenté de mettre en cause, compte tenu de la mesure psychrométrique, est bien sûr la température.

On sait toutefois que l'oscillation thermique journalière dans le sol s'amortit très rapidement en profondeur en même temps qu'elle subit un déphasage. Ainsi, à 40 centimètres de profondeur, en moyenne, la température varie en opposition de phase avec celle de la surface (retard de 12 heures) et l'amplitude thermique y est environ 20 fois plus faible. Le fait qu'aucun déphasage bien net (fig. 3) n'apparaisse en profondeur en ce qui concerne la variation diurne du potentiel matriciel indique que la plus grande part de cette variation résulte d'un phénomène autre que thermique.

Il y a tout lieu de penser qu'elle est due à un autre phénomène périodique, donc très probablement à la variation journalière de l'évapotranspiration (représentée en tireté sur la fig. 3) et qu'elle reflète avec un minimum de déphasage et de déformation (dus au sol lui-même, et aussi au temps de réponse des micropsychromètres) la variation de la succion au niveau des racines de la culture.

En effet, l'évapotranspiration entraîne une absorption d'eau par les racines à divers niveaux dans le sol. Le sol se dessèche progressivement autour des racines tout au long de la journée, et durant la nuit, en l'absence de transpiration, ce dessèchement peut faire place à une certaine réhumectation à partir des zones plus humides.

Nous avons donc recherché la relation existant entre l'amplitude de potentiel observée et l'ETP journalière. Nous avons retenu pour cela une période de dessèchement continu durant laquelle les précipitations ont toujours été suffisamment faibles pour ne pas entraîner de réhumectation à 10 centimètres de profondeur (12 août au 30 août 1974). La corrélation obtenue est significative, mais faible, si l'on considère l'ensemble des emplacements à une profondeur donnée. Il en ressort que l'ETP seule n'explique qu'environ 10 à 20 p. 100 de la variance totale de l'amplitude journalière de potentiel.

En fait, seule une part de l'eau de l'évapotranspiration est issue d'une tranche déterminée du sol. La contribution de cette tranche dépend de la disponibilité de l'eau qu'elle contient, donc de la densité des racines et de la conductivité hydraulique du sol qui diminue avec le potentiel matriciel. C'est pourquoi nous avons introduit le potentiel matriciel moyen de la journée, en testant deux types de relation entre l'amplitude de potentiel, l'ETP journalière et le potentiel matriciel moyen de la journée, $\Delta\psi = a + b.\,ETP + c\psi$ et $\Delta\psi = a.\,ETP^{b}.\,\psi^{c}$.

On constate que cette dernière forme qui paraît plus satisfaisante du point de vue physique donne des résultats un peu meilleurs. La prise en compte du potentiel matriciel avec l'ETP journalière n'explique toutefois la variance totale de l'amplitude que pour une part de l'ordre de 15 à 50 p. 100.

Cette étude nous confirme que la liaison entre l'amplitude de potentiel observée, l'ETP et le potentiel matriciel est loin d'être simple. Ce que l'on sait de la complexité des mécanismes de transferts de l'eau dans le sol, laisse penser qu'une approche purement statistique en l'absence d'un modèle physique est mal adaptée.

Nous avons calculé à partir de la relation potentiel matriciel-humidité $\psi m(\theta)$ établie *in situ* (cf. § 3.4), la variation de stock d'eau qui correspondrait à l'amplitude de potentiel observée. Les résultats montrent que pour la tranche 5-45 centimètres, cette variation calculée (cf. tabl. 1) est systématiquement très supérieure à l'évapotranspiration réelle mesurée pour la journée. Ainsi l'amplitude journalière de potentiel est supérieure à celle qui résulterait simplement du dessèchement du sol, compte tenu de sa relation $\psi m(\theta)$. On peut se demander si ce désaccord ne résulte pas de l'hystérésis puisqu'en régime d'alternance de dessèchement et de réhumectation et pour une même variation de teneur en eau, le potentiel matriciel varie plus fortement que lors d'un dessèchement continu. Il est impossible actuellement de se prononcer sur ce point.

TABLEAU 1

Comparaison de l'évapotranspiration réelle mesurée et de la variation de la réserve d'eau dans la tranche 5-45 cm *correspondant à l'oscillation journalière du potentiel matriciel mesuré, calculée d'après la relation potentiel matriciel-humidité.*

Dates	Variation de la réserve d'eau dans la tranche 5-45 cm (mm)	ETR mesurée (mm)
15/8/1974....	6,0	4,8
25/8/1974....	7,0	2,9
26/8/1974....	6,2	3,9

Le résultat trouvé peut enfin être rapproché d'autres résultats expérimentaux tendant à prouver que la relation obtenue en condition d'équilibre ne s'applique pas lorsque le sol se dessèche rapidement et que Hallaire (1964) a tenté d'expliquer en avançant l'hypothèse du « potentiel efficace » (celui-ci correspondrait au potentiel matriciel augmenté d'un terme correctif fonction de la vitesse de dessèchement). Cette hypothèse repose sur la considération d'un double système de diffusion de l'eau dans le sol ; un système de petite échelle (glomérules de sol, par exemple) assure l'alimentation d'un réseau d'itinéraires privilégiés où s'effectuent les mouvements d'eau macroscopiques tels qu'on peut les observer par les techniques habituelles. Des observations de Rhaiem (1972) tendent à confirmer ce point de vue.

Il est certain que les micropsychromètres employés ici sont situés dans des zones où peuvent régner de très forts gradients de potentiel résultant de la succion des racines. Leur plus grande dimension est en effet de l'ordre d'un centimètre alors que la densité des racines peut dépasser, là où nous les avons utilisés, 1 centimètre de longueur de racines par centimètre cube du sol.

Il se peut donc que les psychromètres fournissent une information plus voisine du

« potentiel efficace » dans les itinéraires privilégiés constitués par les racines que de l'état moyen de liaison de l'eau dans le sol. Dès lors, les valeurs de potentiel matriciel ψm représentatives du degré de liaison de l'eau dans le sol correspondraient aux mesures réalisées en fin de nuit lorsque l'évapotranspiration est nulle depuis plusieurs heures et que le potentiel s'est plus ou moins réhomogénéisé au voisinage des racines.

4.2. — *Variations saisonnières et variabilité spatiale du potentiel matriciel*

Interception de l'eau par les plants de maïs.

La figure 4 montre une différence marquée dans l'évolution des profils de potentiel selon que l'on considère les lignes ou les interlignes de maïs. Lors des pluies, la valeur absolue du potentiel matriciel des couches superficielles diminue beaucoup plus rapidement et plus intensément dans les lignes. Cette observation met en évidence l'interception de l'eau de pluie par les feuilles de maïs. Celles-ci interceptent et dirigent les eaux de pluie vers les pieds. Ainsi les lignes de maïs reçoivent plus d'eau que les interlignes. Ce phénomène est d'ailleurs également mis en évidence par la rigole qui tend à former spontanément sur la ligne, lors des averses importantes.

Variabilité de la distribution de l'eau dans l'espace et de l'activité racinaire.

Nous avons déjà signalé des différences systématiques dans la répartition de l'eau dans le sol dues à l'interception de l'eau par les feuilles. La vitesse de variation du potentiel à un niveau donné, qui traduit en particulier l'action desséchante des racines, varie selon la verticale considérée (cf. courbes *a* et *b*, fig. 4). C'est ainsi qu'après des épisodes pluvieux qui ramènent le potentiel au voisinage de 0, à 10 centimètres de profondeur sur les lignes, la valeur absolue du potentiel au niveau des lignes croît plus rapidement que dans les interlignes. Cela traduit un prélèvement préférentiel aux points les plus humides où l'eau est plus mobile.

La comparaison des deux profils correspondant à la même situation (soit ligne, soit interligne) montre également des différences de répartition et d'évolution du potentiel. La localisation de l'eau dans le sol et son exploitation par les racines sont donc très hétérogènes. Une description du potentiel hydrique et de l'activité des racines devra nécessairement tenir compte de ces hétérogénéités.

Cette hétérogénéité horizontale du potentiel doit entraîner l'existence de flux multidimensionnels à des échelles de l'ordre de 10 centimètres.

Si l'on fait abstraction des variations aléatoires dans la direction horizontale des lignes de maïs, on peut envisager une description bidimensionnelle du système sol-plante. Notons toutefois qu'en dehors des périodes immédiatement consécutives à un épisode pluvieux, le dessèchement se poursuit d'une façon assez indépendante de l'effet ligne-interligne. Une analyse unidimensionnelle selon la profondeur peut alors se justifier au moins en première approximation. L'expérience montre alors que 4 mesures simultanées, à un même niveau, conduisent à une incertitude sur la moyenne de l'ordre de 0,5 à 1,5 bar (cf. fig. 5).

4.3. — *Ascension capillaire*

L'examen de la figure 4 montre qu'au début de la réhumectation superficielle dar les pluies de septembre (à partir du jour n° 242), les niveaux 30 et 40 centimètres

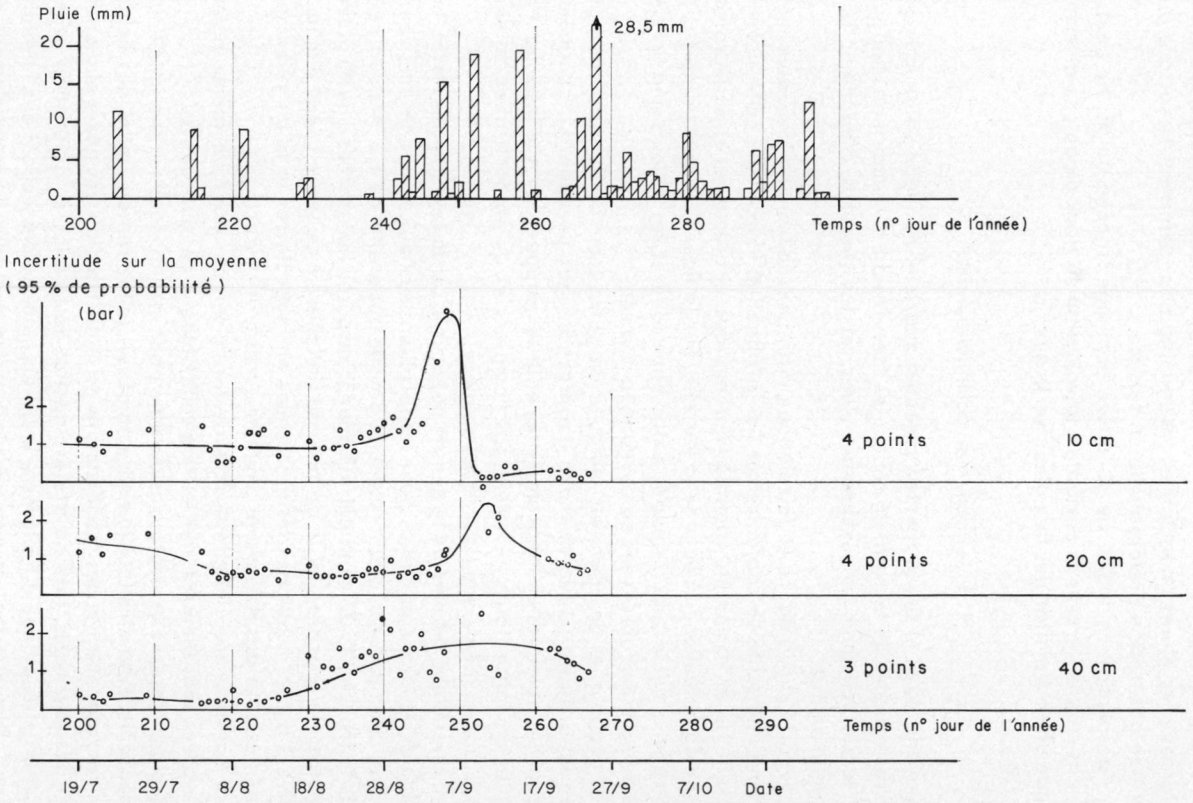


FIG. 5. — *Evolution de l'incertitude sur la moyenne journalière de potentiel à une profondeur donnée au cours de la saison (probabilité 95 p. 100)*

commencent à se réhumidifier bien que le niveau 20 centimètres en cours de réhumectation sous l'effet des pluies soit encore plus sec. Ce phénomène s'observe sur tous les profils ; il ne peut donc être dû à des apports d'eau latéraux et ne s'explique que par les remontées d'eau des couches inférieures du sol. Ce transfert *per ascensum* masqué durant toute la phase du dessèchement du sol par une intense absorption racinaire, apparaît lorsque les pluies importantes ont mouillé abondamment la surface du sol entraînant une absorption préférentielle en surface.

Ainsi, l'absorption racinaire de la culture dans une tranche du sol ne peut être assimilée sans risque d'erreur importante à la variation du stock d'eau ; sa détermination implique une estimation des flux d'eau verticaux.

4.4. — *Relation potentiel-humidité*

Nous avons établi *in situ* la relation potentiel matriciel-humidité volumique $\psi m(\theta)$ pour diverses couches de terrain, en reliant les mesures du potentiel matriciel par les méthodes tensiométriques et psychrométriques, et les mesures d'humidité par la méthode neutronique.

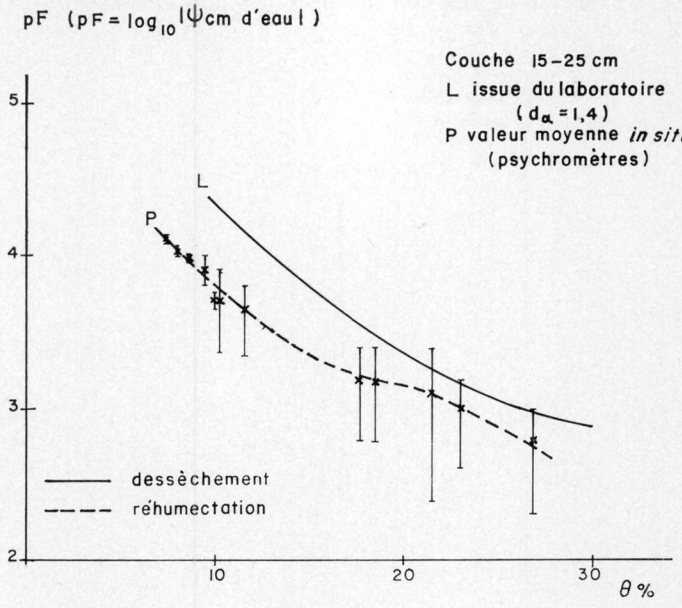
On a reporté sur la figure 6*a* la relation $\psi m(\theta)$ pour la tranche 15-25 centimètres, en indiquant l'intervalle de confiance sur ψm (probabilité 95 p. 100) ; cette incertitude sur ψm résulte de la variabilité spatiale (systématique et aléatoire) et de la variation systématique du potentiel au cours de la journée. Sur la figure 6*b*, sont indiquées pour la même tranche de sol, les relations entre l'humidité et les valeurs maximales et minimales de potentiel observées au cours de la journée.

Sur les graphiques 6*a* et 6*b*, est indiquée en outre (courbe L), la relation $\psi m(\theta)$ obtenue en laboratoire par la méthode d'extraction sous pression. La comparaison entre les courbes obtenues en laboratoire (L) et *in situ* supposerait que les échantillons de sol traités en laboratoire ne soient pas remaniés et qu'en particulier, la densité apparente d_a soit la même que pour le sol en place.

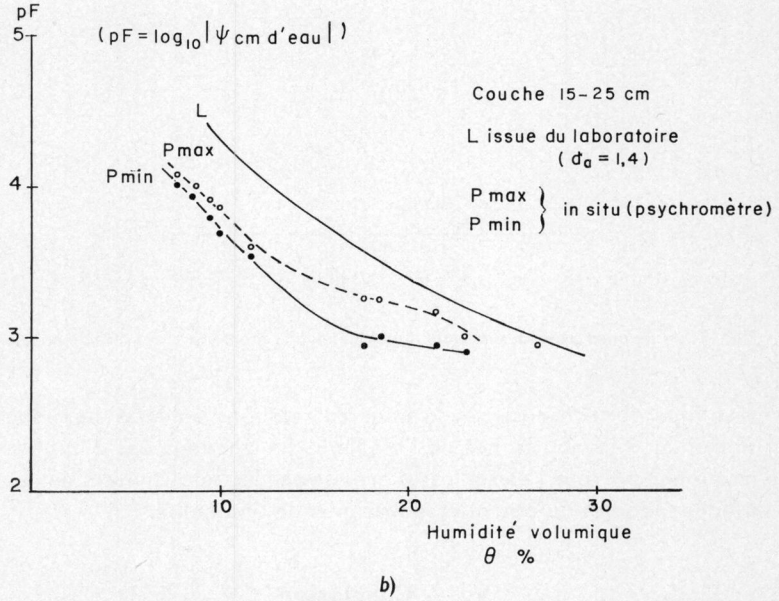
En fait, on sait que cet effet de la densité apparente sur la relation $\psi m(H)$ (H, humidité pondérale) est faible, du moins pour les sols limoneux aux humidités inférieures à la capacité au champ. Ainsi, ayant retenu la densité apparente de 1,4 (valeur relevée *in situ* pour la tranche 15-25 centimètres) pour transposer les courbes $\psi m(H)$ obtenues en laboratoires en courbes $\psi m(\theta)$, on pouvait s'attendre à ce que, en dépit de l'incertitude relative à d_a, les relations $\psi m(\theta)$ obtenues en laboratoires et *in situ* soient quasiment les mêmes pour des valeurs de ψm inférieures à — 1 bar.

Or, on constate que l'humidité relevée sur le terrain pour un même potentiel matriciel, est très sensiblement inférieure à celle obtenue en laboratoire.

Le décalage observé est trop considérable pour être dû seulement à un effet de la densité apparente. Peut-être faut-il mettre en cause, soit le remaniement des échantillons de sol correspondant à des modifications de la distribution des pores et à un réarrangement des particules, lors du prélèvement et de la mise en saturation en laboratoire, soit un phénomène d'hystérésis, le sol en place se desséchant et s'humidifiant constamment alors que les mesures de laboratoire sont effectuées en partant de la saturation. En fait, il n'a pas été possible, dans les limites de la période étudiée, de mettre en évidence un phénomène d'hystérésis dans la relation potentiel-humidité obtenue aux humidités relativement faibles avec la méthode psychrométrique. De même, dans la tranche plus profonde (80-90 centimètres) à humidité plus élevée et



a)



b)

FIG. 6. — *Comparaison entre la relation potentiel matriciel-teneur en eau* Ψm (θ) *issue du laboratoire (courbe* L) *et celle établie* in situ *avec les micropsychromètres (courbe* P) :

a) valeurs moyennes du potentiel *in situ* et incertitude sur la moyenne (probabilité 95 p. 100) ;

b) valeurs extrêmes résultant de la variation journalière.

équipée de tensiomètres, la relation ne présente pas une hystérésis bien significative (fig. 7).

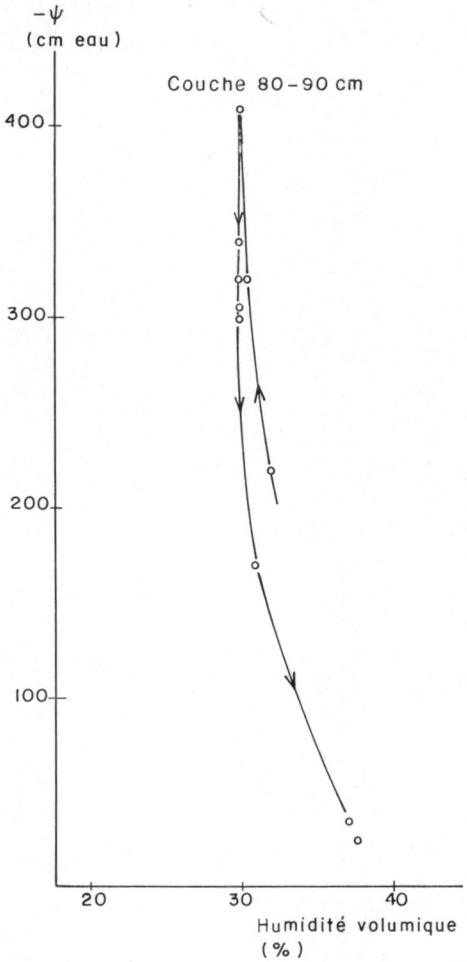


FIG. 7. — *Relation potentiel matriciel-humidité établie* in situ *avec les tensiomètres.*

L'impossibilité de transposer au champ les relations potentiel-humidité établies en laboratoire, la méconnaissance de l'ampleur des phénomènes d'hystérésis affectant cette relation *in situ* (que l'on sait assez grande en laboratoire) justifient les mesures directes et indépendantes du potentiel matriciel et de l'humidité.

V. — Conclusion

Il ressort des mesures de potentiel de l'eau du sol réalisées dans un champ de maïs au cours de l'été 1974, à l'aide de micropsychromètres et de tensiomètres, que la variabilité spatiale du potentiel matriciel est très grande dans la zone exploitée par les

racines. Elle résulte en partie de l'effet « entonnoir » des feuilles de maïs. Dès lors, si le climat hydrique du sol peut être caractérisé par un potentiel moyen, le problème d'échantillonnage demeure important. Pour que l'intervalle de confiance de cette moyenne soit assez petit, il faut un nombre de mesures plus ou moins grand suivant l'hétérogénéité : pour la culture de maïs, 4 mesures nous donnent un intervalle de confiance de l'ordre de 0,5 à 1,5 bar. La caractérisation du climat hydrique par une moyenne peut être insuffisante si l'on ne prend pas en compte l'hétérogénéité.

La méthode micropsychrométrique est assez fine pour mettre en évidence des variations du potentiel durant la journée, mais l'intérêt de ces observations est limité en raison de la difficulté que nous avons d'interpréter cette oscillation.

Une part de cette variation journalière peut résulter aussi d'une action des gradients de température. Malgré toutes les précautions prises pour en minimiser les effets (horizontalité des micropsychromètres), les capteurs perturbent toujours les transferts de vapeur d'eau. Il y a tout lieu de penser que les erreurs en résultant sont faibles. Des expériences en laboratoire avec ou sans plantes, permettront peut-être de préciser cette question.

Le vieillissement des micropsychromètres n'apparaît qu'exceptionnellement à l'échelle d'une saison, mais une diminution du coefficient d'étalonnage peut être constatée au bout d'un an, probablement due à une détérioration de la soudure du thermocouple.

Ainsi est-il préférable de déterrer au moins une fois par an les micropsychromètres et d'en refaire l'étalonnage.

Les micropsychromètres à effet Peltier constituent malgré tout un bon outil pour mesurer le potentiel matriciel en complément des tensiomètres. Ils sont particulièrement adaptés pour les études de fonctionnement du système racinaire. Leur mise en œuvre n'est pas trop difficile bien qu'elle nécessite un étalonnage.

Il apparaît enfin que l'extrapolation au champ de la relation potentiel-humidité établie en laboratoire pose un problème. Cela renforce donc l'intérêt de disposer de techniques de mesure *in situ* du potentiel.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Study in situ *of the water potential under a maize culture with a system of automatic measurement by a micropsychrometer with Peltier effect*

The use of micropsychrometers with Peltier effect and tensiometers made possible the study of the variations in soil matrix potential under a maize culture in space and time (fig 1 and 2).

In spite of the cares adopted after previous works, a daily oscillation of the potential which may reach 4 bars (fig 3) is observed which can be attributed neither to thermic effects nor only to a variation of water content caused by evapotranspiration. The evolution of the potential at the different depths (fig 4) during a summer revealed the existence of capillary water uplifting from the depth towards the zones dried up by the culture. A great horizontal variability was stated which is due partly to the heterogeneity introduced by maize line culture and partly to the random root distribution. A good description of the « water climate » in soil requires therefore several measurements.

The simultaneous measurement of the voluminal humidity through the neutron method enabled to observe the relationship of the potential and the humidity. No significant hysteresis effect could be stated (fig 6 and 7), but it appears that the extrapolation of the relationships of potential and humidity

stated on soil samples under laboratory conditions to the field (fig 6*a*, 6*b*) must be cautiously undertaken, which stresses the interest of knowing techniques for measuring directly matrix potential and humidity.

In the appendix the system of data acquisition meant for processing directly with a computer the psychrometric datas necessary to obtain the matrix potential (fig 8 and 9) is presented.

Zusammenfassung

In situ *Untersuchung des Wasserpotentials unter einer Maiskultur mit Hilfe eines automatischen mit einem vom Peltiereffekt betätigten Mikrofeuchtigkeitsmesser ausgestatteten Messystems*

Die Anwendung von vom Peltiereffekt betätigten Mikrofeuchtigkeitsmessern und Tensiometern erlaubte, die Schwankungen des Bodenmatrixpotentials unter einer Maiskultur im Hinblick auf Raum und Zeit zu studieren (Abb. 1 und 2).

Trotz der nach Voruntersuchungen getroffenen Vorsichtsmassnahmen gibt es eine tägliche Schwankung des Potentials, die 4 Bars erreichen bonnte (Abb 3), und die weder auf thermische Effekte noch auf ein nur durch Evapotranspiration bedingten Variation des Wassergehalts zurückgeführt werden kann. Die Potentialentwicklung zu den verschiedenen Tiefen (Abb 4) im Laufe des Sommers erwies das Vorhandensein von kapillaren Wasseranstiegen aus der Tiefe in Richtung der durch die Kultur getrockneten Zonen. Eine grosse horizontale Variabilität wurde beobachtet, die teils aus der von Maisreihenkultur bedingten Heterogenität und teils aus der zufälligen Wurzelverteilung stammt. Eine ausreichende Beschreibung des « Wasserklimas » im Boden verlangt demzufolge mehrere Messungen.

Gleichzeitige Messungen der Volumenfeuchtigkeit mit der Neutronenmethode erlauben, die Beziehung zwischen dem Potential und der Feuchtigkeit zu beobachten. Kein bezeichnender Hysteresiseffekt wurde dargelegt (Abb 6 und 7) aber es scheint dass die Extrapolation auf Feldverhältnisse der im Laboratorium auf Bodenproben festgestellten Potential-Feuchtigkeit Beziehungen (Abb 6*a*, 6*b*) mit Vorsicht gemacht werden muss, was das Verfügen üben Techniken zur direkten Messung des Matrixpotentials und der Feuchtigkeit wünschenswert macht.

In der Anlage wird ein Datenerfassungssystem vorgestellt, das inder lage ist, die zur Errechnung des Matrixpotentials notwendigen Feuchtigkeitsmesserdaten mit der Datenverarbeitungsanlage direkt zu behandeln.

РЕЗЮМЕ

Изучение *in situ* водного потенциала под культурой кукурузы, с помощью автоматизированной системы измерения микропсихрометром с эффектом Пелтье.

К. ВАЛАНКОНЬ, Ф. А. ДОДЕ.

Применение микропсихрометров с эффектом Пелтье, и тенсиометров, позволило изучить изменения в пространстве и времени матричного потенциала под культурой кукурузы (Рис. 1 и 2).

Несмотря на принятые после опыта пред'идущих работ меры предосторожности, дневные колебания потенциала достигали 4-х бар (Рис. 3), и их невозможно было отнести, ни за счет тепловых эффектов, ни за счет изменения содержания воды, вызванного эвапотранспирацией. Эволюция потенциала на различных глубинах (Рис. 4) в течении лета выявила существование капилярных под'емов влаги из глубин к зонам осушенным культурой. Констатирована была также и сильная горизонтальная изменчивость, частично вызванная гетерогенностью культуры кукурузы рядками и случайным расположением корней. Для точного описания «водного климата» необходимо, значит, провести несколько измерений.

Одновременные измерения об'емной влажности методом нейтронных влагомеров позволили вывести соотношение существующее между потенциалом и влажностью. Никакого выразительного эффекта гистерезиса не было выявлено (Рис. 6 и 7), но оказалось что экстраполяция на почвы соотношения потенциал/влажность, полученного в лабораторных условиях, на почвенных образцах (Рис. 6а и 6б), должна проводиться с осторожностью, откуда и интерес иметь в своем распоряжении весь технический материал необходимый для прямого измерения как матричного потенциала, так и влажности.

В приложении предлагается система получения психрометрических данных, необходимых при вычислении матричного потенциала, предназначенных для прямой обработки на электронной вычислительной машине.

Références bibliographiques

DAUDET F. A., VALANCOGNE Ch., 1976. Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires ; leur importance dans le bilan hydrique. *Ann. agron.*, **27** (2), 165-182.

HALLAIRE M., 1964. *Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement.* In *L'eau et la production végétale.* I.N.R.A., Paris, 27-62.

RHAIEM H., 1972. Mesures comparées du potentiel matriciel de l'eau dans le sol en cours de dessèchement et à l'équilibre ; vérification de l'existence d'un potentiel efficace. *C. R. Acad. Sc. Paris*, Série D, t. **274**, 3194-3196.

SPANNER D. C., 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Bot.*, **2**, 145-168.

VALANCOGNE Ch., DAUDET F. A., 1974. Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : problèmes posés par la température. *Ann. agron.*, **25** (5), 733-751.

Voir aussi la bibliographie du dernier article ci-dessus

Annexe

Enregistrement numérique des données micropsychrométriques nécessaires à la détermination du potentiel hydrique du sol

Un dispositif automatique de mesure du potentiel hydrique *in situ* basée sur une méthode psychrométrique avec enregistrement analogique a été décrit dans un article

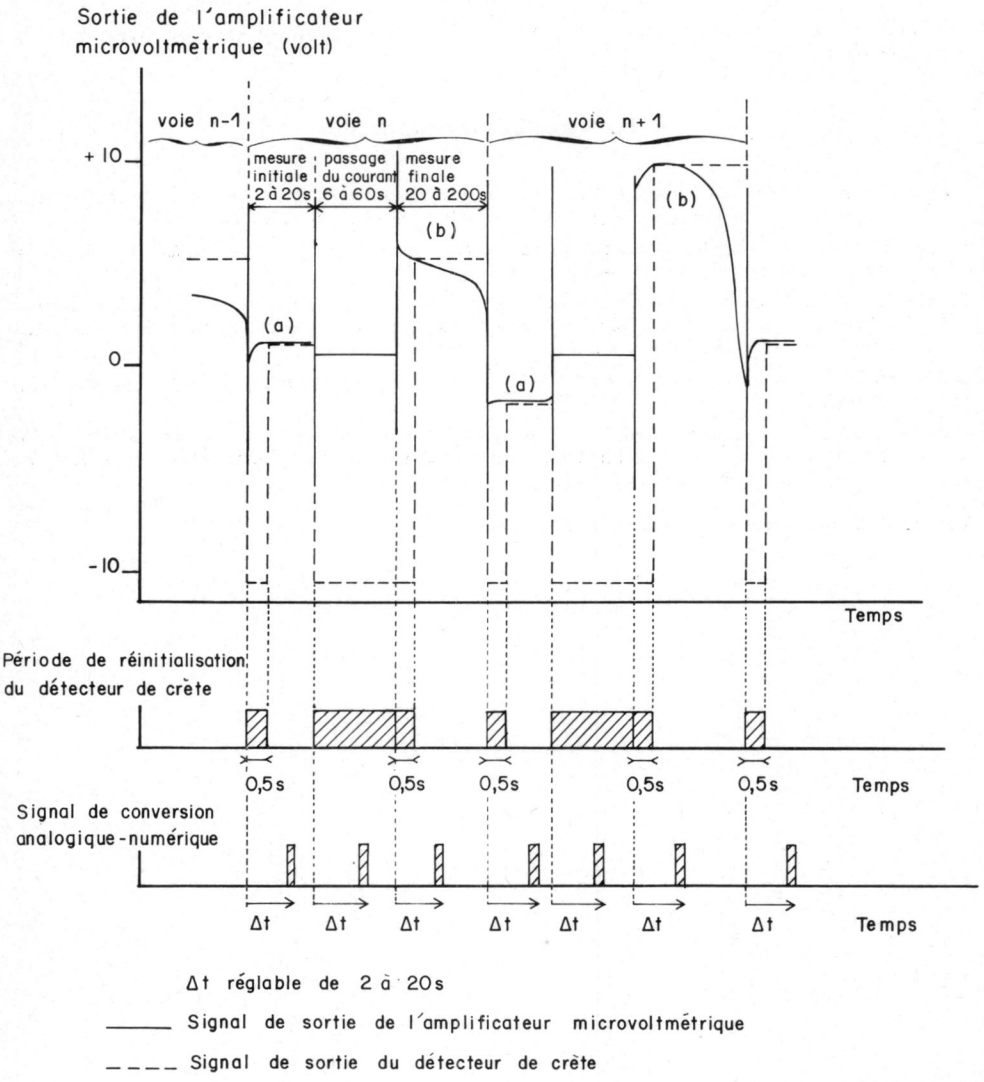


FIG. 8. — *Signaux analogiques provenant du dispositif psychrométrique et leur traitement par un détecteur de crête en vue de l'enregistrement numérique des informations* : (a) *f.é.m. du thermocouple psychrométrique sec* ; (b) *f.é.m. du thermocouple humide* ; *pendant la phase de passage du courant est effectuée la mesure de température du psychromètre* (c).

précédent (1). La multiplication des points de mesure imposée par l'hétérogénéité de la distribution du potentiel dans la zone racinaire, et la plus grande fréquence des mesures nécessitée par l'existence d'une variation journalière du potentiel nous ont amenés à adopter un enregistrement numérique permettant un dépouillement automatique sur ordinateur.

Le ruban perforé a été retenu comme support d'enregistrement car son utilisation est compatible avec la plupart des ordinateurs ou calculateurs de bureau.

La mise sous forme numérique des données de tension électrique des micropsychromètres à effet Peltier nous a amenés à modifier l'appareillage antérieur.

1. *Informations à enregistrer.*

Trois informations sont nécessaires pour déterminer le potentiel hydrique :

a) *La force électromotrice (f.é.m.) initiale du thermocouple psychrométrique.* Cette f.é.m. est sensiblement constante à l'échelle de quelques secondes.

b) *La f.é.m. du thermocouple psychrométrique humide* après condensation d'eau sur la soudure résultant du refroidissement obtenu par effet Peltier : cette valeur varie au cours du temps en raison des phénomènes thermiques transitoires et avec la disparition progressive de l'eau par évaporation. On peut retenir pour le dépouillement la valeur maximale de la f.é.m. suivant la phase de passage du courant et le pic de tension résultant de la commutation « courant-mesure » (cf. fig. 8). Pour être valable, cette convention doit aussi être retenue lors de l'étalonnage des micropsychromètres.

c) *La f.é.m. du thermocouple joint au thermocouple psychrométrique* qui sert à déterminer la température nécessaire pour corriger le coefficient d'étalonnage du micropsychromètre. Cette f.é.m. ne varie pas sensiblement au cours des quelques secondes nécessaires à la mesure.

2. *Obtention des informations numériques.*

La conversion des informations analogiques (*a*) et (*c*) en informations numériques ne pose pas de problèmes puisqu'elles ne varient pas sensiblement au cours du temps nécessaire à la mesure. Mais un dispositif spécial est nécessaire pour enregistrer l'information (*b*). Compte tenu de la convention retenue ci-dessus, l'installation d'un détecteur de crête à la sortie de l'amplificateur microvoltmétrique solutionne le problème. Le signal de sortie d'un tel dispositif suit le signal d'entrée tant que ce dernier croît, et se bloque à la valeur maximale lorsque celui-ci décroît.

Toutefois ce détecteur de crête doit être enclenché après la pointe de tension transitoire résultant de la commutation « courant-mesure » (0,5 seconde environ) afin de ne pas retenir cette information qui n'a aucun intérêt. Après un temps de l'ordre de 5 secondes, on est pratiquement sûr que l'information (*b*) a été enregistrée par le détecteur de crête ; il suffit alors d'opérer la conversion analogique-numérique. Le fonctionnement du détecteur de crête est indiqué sur la figure 8.

(1) Valancogne Ch. et Daudet F. A., 1974. Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : problèmes posés par la température. *Ann. agron.*, **25**, (5), 733-751.

3. *Principe de fonctionnement du système (fig. 9).*

Comme dans le système antérieur, une unité de programmation commande la commutation de voie ainsi que le branchement du psychromètre sur l'amplificateur microvoltmétrique ou sur une source de courant.

Après chaque commutation permettant soit de scruter un nouveau psychromètre, soit de relier le microspsychromètre à l'amplificateur microvoltmétrique ou à une source de courant, on déclenche, avec un certain retard réglable (1) de 1 à 20 secondes, la conversion numérique des informations analogiques provenant du détecteur de

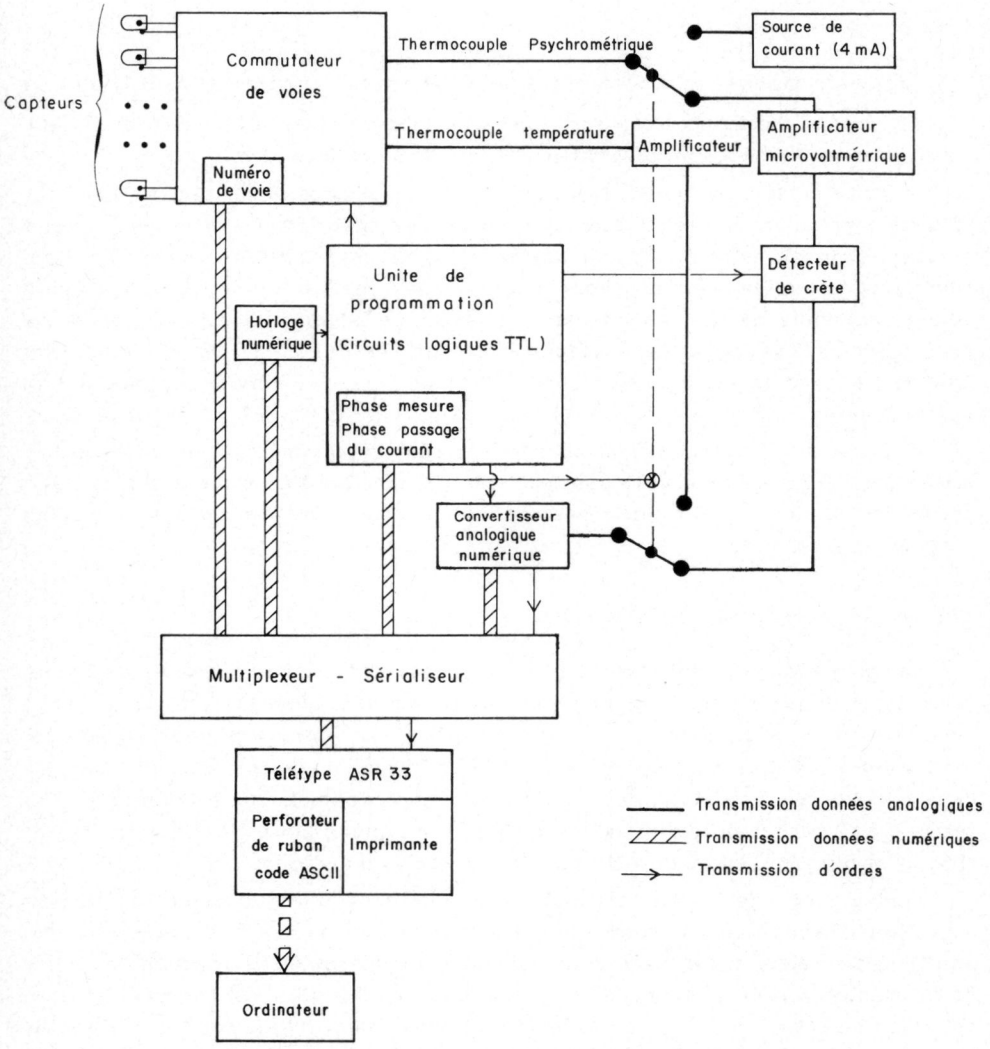


FIG. 9. — *Représentation schématique du système d'acquisition de données psychrométriques.*

(1) Ce retard est fonction du comportement des micropsychromètres à la fin de l'humidification. Ce comportement dépend en grande partie de l'intensité du courant employé pour le refroidissement par effet Peltier.

crête, ou de l'amplificateur de tension du thermocouple servant à la mesure de la température (durant la phase de passage du courant) (fig. 8). La conversion analogique/numérique achevée, un ordre d'impression est envoyé. Les informations numériques de temps données par une horloge numérique, de numéro de voie fournies par le commutateur de voie d'état du psychromètre (phase de mesure, phase de passage du courant), de tension provenant du convertisseur analogique/numérique sont mises en série (multiplexeur, sérialiseur) puis simultanément imprimées et perforées sur ruban de papier en code ASCII (le plus couramment utilisé).

Le ruban perforé est ensuite dépouillé sur ordinateur. Un programme permet l'élimination des erreurs qui pourraient résulter d'un mauvais fonctionnement du système automatique de mesure.

Ann. agron., 1977, **28** (2), 159-169.

Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*

IV. — Influence de l'âge et des éclairements passés sur le potentiel photosynthétique des feuilles cotylédonaires

R. BONHOMME *, C. VARLET GRANCHER *, M. CHARTIER * ET P. ARTIS

Station de Bioclimatologie
Centre de Recherches Agronomiques des Antilles et de la Guyane, I.N.R.A., Domaine Duclos
97170 Petit-Bourg (Guadeloupe)

Résumé

La mesure des rayonnements incidents sur les feuilles cotylédonaires de *Vigna sinensis* a été effectuée dans les conditions naturelles sous différentes densités, avec ou sans ombrage. Il apparaît que le potentiel photosynthétique des feuilles, caractérisé ici par Pn max (palier de la courbe photosynthèse nette-éclairement) croît avec l'éclairement reçu pendant les jours précédents (10 jours environ) mais est, par ailleurs, fonction décroissante de l'âge. La relation établie permet une bonne simulation de la reprise d'activité de feuilles âgées soumises, par éclaircissage, à une augmentation de l'éclairement incident.

Les caractéristiques foliaires (propriétés optiques, teneur en chlorophylle, masse surfacique, épaisseur, densité et indice stomatiques) varient selon les traitements, mais ne peuvent expliquer les différences de photosynthèse observées.

I. — Introduction

La photosynthèse d'une feuille à un instant donné dépend des conditions extérieures auxquelles elle est soumise et de son potentiel photosynthétique (caractérisé par la courbe photosynthèse nette-éclairement). De nombreux travaux ont montré que le potentiel photosynthétique n'est pas constant au cours du cycle végétatif ; ses variations ont pu être reliées :

— au vieillissement de la feuille (Sestak et Catsky, 1967),

— aux conditions d'éclairement subies antérieurement par celle-ci (Bourdu et Prioul, 1974 ; Pearce *et al.*, 1969; ...).

Pour montrer l'influence respective de ces deux facteurs, les auteurs ont étudié : soit l'adaptation de la feuille à différents climats lumineux de croissance (Prioul, 1971 ; Bourdu et Prioul, 1974), soit la reprise d'activité d'une feuille après défoliation des couches supérieures (Schoch, 1974) ou après passage des plantes sous différents éclairements en conditions artificielles (Pearce et Lee, 1969 ; Woledge, 1971).

* Adresse actuelle : Station de bioclimatologie, C.N.R.A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.

Les résultats de ces travaux sont essentiellement qualitatifs et peuvent être critiqués sur les points suivants :

— les conditions de croissance sont souvent artificielles et les éclairements obtenus généralement très faibles par rapport aux rayonnements naturels ;

— certains traitements (défoliation) sont susceptibles de perturber l'activité physiologique de la plante ;

— l'énergie effectivement reçue par la feuille n'est jamais prise en compte, seul l'éclairement incident sur le couvert végétal est parfois mesuré.

Nous avons donc cherché à quantifier l'influence de la lumière et de l'âge sur la photosynthèse de feuilles cotylédonaires de *Vigna sinensis*. Pour cela, nous avons suivi l'évolution, au cours du cycle végétatif, du pouvoir photosynthétique et de l'énergie reçue par ces feuilles, en conditions naturelles ; des variations d'éclairement étaient obtenues par :

— les densités de semis différentes,
— la mise en place d'un ombrage en début de culture,
— l'éclaircissage d'une forte densité en fin de cycle.

Afin de pouvoir expliquer les variations du potentiel photosynthétique, nous avons mesuré, sur ces mêmes feuilles, certaines caractéristiques foliaires :

— propriétés optiques,
— teneur en chlorophylle,
— masse surfacique,
— épaisseur,
— densité et indice stomatiques.

2. — Méthodes et techniques

La variété de *Vigna sinensis* étudiée, V53, est semée selon deux densités : 4 et 100 plantes par mètre carré. Une ombrière est placée pendant 12 jours, sur la moitié de chaque parcelle (125 mètres carrés), immédiatement après le déplissement des feuilles cotylédonaires ; le rayonnement incident est alors réduit d'environ 50 p. 100, sa composition spectrale n'étant pas modifiée. Vers la fin du cycle végétatif, une partie de chacun des traitements de la forte densité (ombrée-non ombrée) est éclaircie pour obtenir le même nombre de plantes que celui de la faible densité.

L'éclairement (en watt. m^{-2}) au niveau des feuilles cotylédonaires G est mesuré par des pyranomètres linéaires (Combres *et al.*, 1970). Le rayonnement solaire global (G_0) reçu par la culture est obtenu à partir d'un pyranomètre de Moll (Kipp et Zonen). Les intégrations journalières de G et de G_0 sont effectuées pour calculer la part d'énergie incidente transmise aux feuilles : G/G_0. La valeur moyenne de l'éclairement journalier G pendant une décade est notée : Σ G.

Le potentiel photosynthétique est caractérisé par la relation entre l'assimilation nette de l'unité de surface de feuille (Pn) et l'éclairement. La mesure est faite en chambre d'assimilation sur des feuilles prélevées (sous l'eau) sur des plantes prises au champ tôt le matin, alimentées en eau par leur pétiole (Bonhomme *et al.*, 1974) et maintenues horizontales. La chambre d'assimilation utilisée pour mesurer Pn est analogue à celle de Chartier *et al.* (1971). Les feuilles (de surface S) sont placées dans une enceinte

ventilée (approximativement 1 $m.s^{-1}$) et maintenue à une température moyenne de 28 °C ; l'hygrométrie n'est pas contrôlée mais reste toujours élevée (air extérieur, climat tropical). Un débit d'air connu Q (environ 200 $l.h^{-1}$) circule dans la chambre de façon à maintenir la différence de concentration du gaz carbonique (ΔCO_2) entre l'entrée et la sortie (mesurée par analyseur infrarouge COSMA) inférieure à 50 vpm. Quatre lampes (Quartz-iode OSRAM 1 000 W) permettent d'obtenir au niveau de la feuille des éclairements pouvant atteindre 1 000 watts.m^{-2} (soit environ 2 000 micro-einsteins $m^{-2}.s^{-1}$). L'assimilation nette (kg de CO_2 $m^{-2}.s^{-1}$) est obtenue par la formule :

$$Pn = (\Delta CO_2).Q/S.$$

Un dispositif à miroir hémisphérique réalisé d'après le modèle de Sinclair et Thomas (1970) permet de mesurer les facteurs de réflection et de transmission des feuilles dans la gamme des longueurs d'onde visibles ; on en déduit ainsi leur facteur d'absorption. La teneur en chlorophylle est estimée par la méthode de MacKinney (1941). L'épaisseur des feuilles est mesurée au microscope (oculaire micrométrique) sur des coupes fraîches (microtome Labline). La masse surfacique des échantillons est calculée à partir du poids de matière sèche (après mise à l'étuve à 80 °C pendant 24 heures) et de la surface (obtenue au planimètre électronique Metraplan). Des empreintes au collodion de la face supérieure (Schoch, 1972) permettent d'évaluer la densité (nombre de stomates par millimètre carré) et l'indice (nombre de stomates)/(nombre de stomates + nombre de cellules) stomatiques.

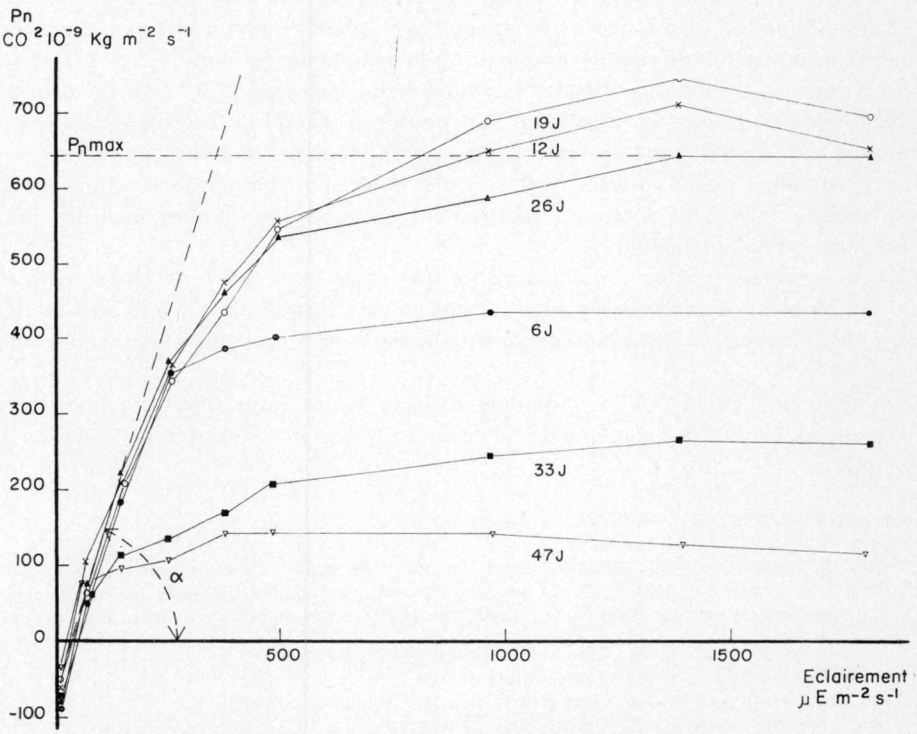


FIG. 1. — *Potentiel photosynthétique* (Pn) *en fonction de l'éclairement* (micro-einsteins m^{-2} s^{-1}) *pour des feuilles cotylédonaires de* Vigna Sinensis *de différents âges* (en jours après le semis).

Chaque point expérimental (assimilation nette à un éclairement donné) est obtenu par la mesure simultanée des échanges de CO_2 sur 6 à 8 folioles. On peut estimer que la précision sur Pn est de l'ordre de 50.10^{-9} kg CO_2 $m^{-2}.s^{-1}$.

3. — Résultats

La figure 1 donne, pour une expérience préliminaire, un exemple d'évolution du potentiel photosynthétique des feuilles cotylédonaires, au cours du temps (nombre de jours après le semis). Les courbes représentatives peuvent être caractérisées par deux paramètres (Chartier, 1966) :

— la pente à l'origine α,

— l'assimilation nette maximale : Pn max.

Les variations de α étant faibles, nous n'avons étudié dans ce qui suit, que celles de Pn max (déterminé pour 3 éclairements forts).

La figure 2 montre l'évolution de Pn max, de la part de l'énergie incidente transmise aux feuilles dans la végétation (G/G_0), et des autres caractéristiques foliaires, en fonction du temps pour les différents traitements.

3.1. — *Evolution des paramètres étudiés pour les feuilles cotylédonaires de la parcelle témoin à faible densité*

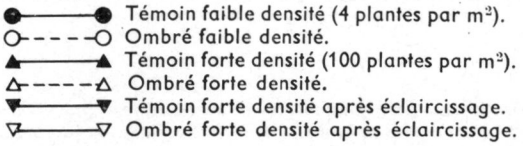
Bien qu'une partie importante des variations de Pn max doit être attribuée à l'échantillonnage, il apparaît que le potentiel photosynthétique passe par deux maximums puis diminue régulièrement jusqu'à la chute des feuilles.

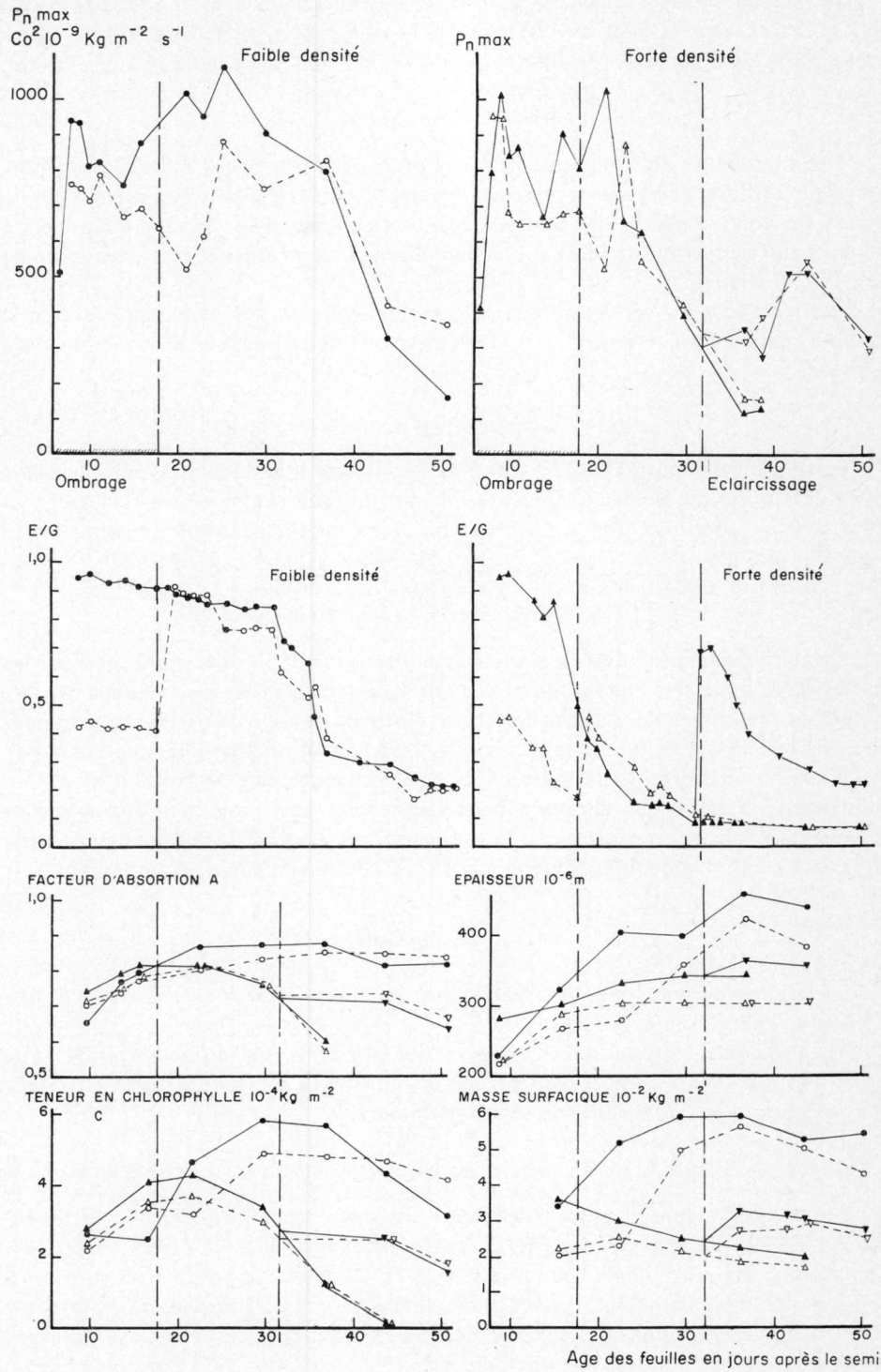
Le premier maximum, atteint très rapidement, correspond à la fin du grandissement foliaire ; le second, plus tardif, est peut-être dû à un accroissement de la demande photosynthétique du reste de la plante (début de la phase de forte croissance végétative de la culture, Koller *et al.*, 1970). La diminution marquée de Pn max semble intervenir lorsque l'éclairement reçu par les feuilles lors des jours précédents décroît fortement.

Les variations du facteur d'absorption (A) et de la teneur en chlorophylle (C) sont semblables : accroissement régulier des valeurs jusqu'à un plateau puis diminution plus ou moins importante. Les variations de A sont cependant moins marquées que celles de C.

L'épaisseur de la feuille augmente avec le temps pour atteindre une valeur maximale. L'évolution de la masse surfacique diffère par une décroissance en fin de cycle.

FIG. 2. — *Evolution du potentiel photosynthétique* (Pn max), *de la part d'énergie transmise aux feuilles* (G/G_0), *du facteur d'absorption pour la lumière visible* (A), *de l'épaisseur, de la teneur en chlorophylle* (C) *et de la masse surfacique des feuilles cotylédonaires en fonction du nombre de jours après le semis :*




Pn max
Co² 10⁻⁹ Kg m⁻² s⁻¹
Faible densité
Forte densité
1000
500
0
10
20
30
40
50
Ombrage
Eclaircissage
E/G
1,0
0,5
FACTEUR D'ABSORTION A
EPAISSEUR 10⁻⁶m
400
300
200
TENEUR EN CHLOROPHYLLE 10⁻⁴Kg m⁻²
C
MASSE SURFACIQUE 10⁻²Kg m⁻²
6
5
4
3
2
1
Age des feuilles en jours après le semis

Les variations de l'indice et de la densité stomatiques (Si, Sd) ne sont pas représentées, car, conformément aux résultats de Schoch (1972), leurs valeurs sont constantes dès la fin du grandissement foliaire (Si $\#$ 0,22 ; Sd $\#$ 60 par millimètre carré).

3.2. — *Influence de la densité du semis*

L'augmentation de la densité du semis ne conduit pas à des différences importantes sur l'allure générale des caractéristiques étudiées ; elle influe surtout sur le niveau des valeurs obtenues (épaisseur, teneur en chlorophylle, facteur d'absorption et masse surfacique plus faibles) et par une plus grande précocité dans l'évolution de ces caractéristiques.

Ces modifications sont analogues à celles provoquées par ombrage ; la densité de semis semble donc intervenir essentiellement sur l'énergie reçue au cours du cycle végétatif.

3.3. — *Influence de l'ombrage en début de végétation*

La réduction importante (50 p. cent) de l'éclairement pendant une période assez courte (12 jours) au début de culture a un effet marqué sur la masse surfacique et l'épaisseur qui sont plus faibles. La réduction de Pn est aussi sensible surtout pour la faible densité.

3.4. — *Influence de l'éclaircissage*

L'éclaircissage provoque un accroissement brusque de l'éclairement reçu par les feuilles cotylédonaires. Placées en conditions voisines de celles de la faible densité, ces feuilles présentent alors une nette reprise d'activité qui se traduit par une augmentation de Pn max et de la masse surfacique. Le potentiel photosynthétique passe par un maximum, une dizaine de jours après l'éclaircissage, puis décroît. La teneur en chlorophylle et le facteur d'absorption n'augmentent pas, mais leur diminution se trouve différée de 15 jours environ ; un même retard sur la chute des feuilles est aussi observé. L'éclaircissage, à ce stade, n'a pas eu d'effet sur l'épaisseur des feuilles.

4. — Discussion

L'évolution du potentiel photosynthétique de la feuille semble donc être très liée à celle de l'énergie qu'elle a reçue.

Avant d'essayer de quantifier l'importance respective de la lumière et de l'âge sur la photosynthèse, il faut s'assurer que les variations des autres caractéristiques foliaires ne sont pas à l'origine de celles de Pn max.

4.1. — *Relation entre* Pn max *et les paramètres stomatiques de la feuille*

L'indice et la densité stomatiques étant fixés dès le déplissement de la feuille (Schoch, 1974), il n'y a pas de différences significatives entre les divers traitements (l'ombrage a été placé après cette phase, cf. § 2). De plus, ces paramètres sont constants lorsque la feuille atteint sa surface maximale (ce qui correspond aussi au 1er pic de Pn max). Les variations de photosynthèse ne peuvent donc pas être mises en relation avec ces caractéristiques morphologiques.

4.2. — *Relation entre* Pn max *et l'épaisseur des feuilles*

Le traitement (l'ombrage en début de cycle) qui a le plus d'effet sur l'épaisseur de la feuille est celui qui affecte le moins Pn max : il y a donc une relation lâche entre les variations de ces deux caractéristiques ; le coefficient de corrélation, sur l'ensemble de nos points expérimentaux est de — 0,22.

4.3. — *Relation entre* Pn max *et la masse surfacique*

Certains auteurs ont essayé de relier le potentiel photosynthétique et la masse surfacique afin de chercher un critère de sélection sur la photosynthèse, plus simple à mesurer que Pn max ; sur la luzerne, Pearce *et al.* (1969) ont obtenu une assez bonne relation. Avec le *Vigna Sinensis*, nous avons trouvé sur l'ensemble des résultats, un coefficient de corrélation très faible ($r = 0{,}25$) : mais si l'on ne considère que les valeurs correspondant à des feuilles de moins de 20 jours, la relation est satisfaisante ($r = 0{,}70$).

La masse surfacique peut donc être un critère précoce de l'activité photosynthétique d'une feuille, mais son emploi semble impossible sur des feuilles d'âges différents. Hodanova (1975) a obtenu des résultats analogues sur betterave.

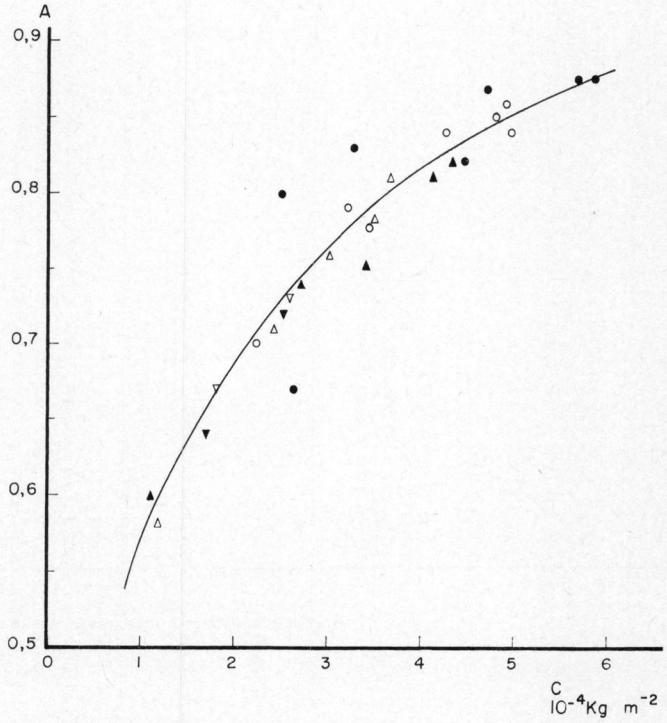


FIG. 3. — *Facteur d'absorption pour la lumière visible* (A) *en fonction de la teneur en chlorophylle des feuilles* (C) ; *mêmes symboles que la figure* 2.

4.4. — *Relation entre* Pn max *et la teneur en chlorophylle*

Le coefficient d'absorption de la lumière visible (A) et la teneur en chlorophylle (C) sont évidemment liés l'un à l'autre. La figure 3 confirme l'équation de type exponentiel : $A = 1 - e^{-KC}$, nous ne discuterons donc que de la relation entre C et Pn max.

Bien que les évolutions de la teneur en chlorophylle et du potentiel photosynthétique en fonction du temps soient semblables, la relation entre Pn max et C n'est significative que pour des feuilles de plus de 20 jours ($r = 0{,}75$). Les variations de ces deux paramètres ne sont pas forcément liées par une relation de cause à effet, mais peuvent être dues aux mêmes facteurs : l'âge et l'éclairement.

4.5. — *Relation entre* Pn max, *l'éclairement reçu antérieurement par les feuilles et leur âge*

La chute du potentiel photosynthétique des feuilles de la faible densité a lieu à des éclairements G plus élevés que pour celles de la forte densité (fig. 2). Cependant, ces feuilles n'ont pas le même âge; aussi, pour dissocier ces deux effets, avons-nous cherché des relations du type :

$$\text{Pn max} = a\,\Sigma G - b\,(\text{âge}) + \text{constante}$$

qui tiennent compte de l'éclairement moyen reçu pendant la décade précédente ΣG et de l'âge (en jours après le semis). Un intervalle de 10 jours a été choisi pour ΣG

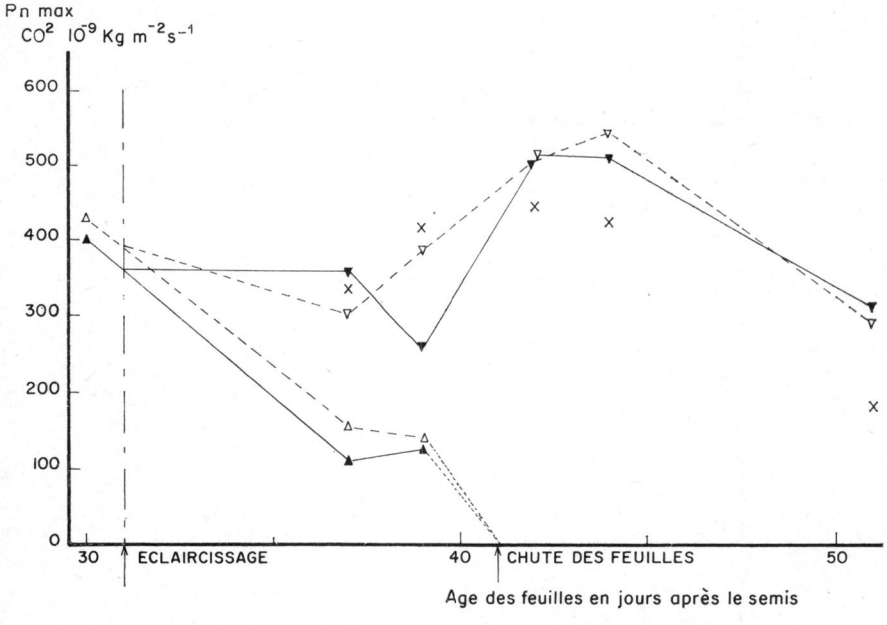


FIG. 4. — *Potentiel photosynthétique, mesuré et calculé, en fonction de l'âge des feuilles :*

▲——▲ Témoin forte densité.
△----△ Ombré forte densité.
▼——▼ Témoin forte densité après éclaircissage.
▽----▽ Ombré forte densité après éclaircissage.
×××××× Valeurs calculées.

car il semble correspondre au « temps de réponse » de la feuille à une brusque variation de son éclairement (effet de l'éclaircissage, cf. § 3.4) et il permet d'obtenir les meilleurs ajustements statistiques.

Sur l'ensemble des points expérimentaux, à l'exception de ceux obtenus après éclaircissage, nous avons obtenu la relation :

$$Pn\ max = 34\ \Sigma G - 2{,}1\ (jours) + 350\ (r = 0{,}84)$$

ΣG en $10^6\ J.m^{-2}$ (jour)$^{-1}$, Pn max en 10^{-9} kg $CO_2\ s^{-1}$.

La relation appliquée après éclaircissage conduit à un accord satisfaisant avec les valeurs de Pn max mesurées (fig. 4).

Les coefficients trouvés dans la relation précédente dépendent évidemment des points expérimentaux qui ont servi à l'établir. Cet ajustement n'a donc pas un caractère général mais il montre que l'éclairement passé et l'âge influent simultanément sur le potentiel photosynthétique des feuilles.

5. — Conclusion

Cette étude réalisée en conditions naturelles montre que :

— les modifications d'éclairement de la feuille entraînent des variations de photosynthèse (Pn max) qui ne sont pas dues à celles des caractéristiques morphologiques observées simultanément, mais sans doute à des modifications cellulaires et biochimiques importantes (Crookston *et al.*, 1975) ; cependant, Pn max varie comme la masse surfacique pour des feuilles de moins de 20 jours et comme la teneur en chlorophylle pour des feuilles âgées ;

— le potentiel photosynthétique de la feuille est fonction de l'énergie qu'elle reçoit ; la période d'adaptation à un brusque changement d'éclairement semble être d'une dizaine de jours ;

— pour un même « éclairement de croissance » ΣG, il y a une diminution du potentiel photosynthétique avec l'âge.

Des résultats analogues (effet de la densité du semis) ont été obtenus sur la 5e feuille.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Use of solar radiation by a crop of Vigna sinensis

IV. — *Influence of age and light intensity on the photosynthesis of cotyledonar leaves*

The measurement of light intensity reaching on cotyledonar leaves of *Vigna sinensis* is effected in natural conditions within crops of different densities with shade or no shade. The leaf photosynthesis capacity, characterized here by the plateau of the curve in function of irradiation, increases with the light intensity received during the former period (of about 10 days), but decreases with age. The relationship leads to a good simulation of the photosynthesis recovery of old leaves when the light is increased by thinning out of plants.

The foliar characteristics (optical values, chlorophyll content, specific leaf weight, thickness, density of stomata) varie but they are not easy correlated with differences in photosynthesis.

Zusammenfassung

Ausnützung der Sonnenenergie durch eine vigna sinensis *Kultur.*

IV. — Einfluss des Alters und der vorigen Belichtungen auf das photosynthetische Potential der Keimblätter

Das Messen der einfallenden Strahlungen auf die Keimblätter von *Vigna sinensis* wurde unter natürlichen Bedingungen mit verschiedenen Dichten, mit oder ohne Schatten, vorgeführt. Es scheint dass das photosynthetische Potential der Blätter, das hier durch Pn max (Stufe der Kurve « Reinphotosynthese-Belichtung) bezeichnet ist, mit der während der vorhergehenden Tage (10 Tagen ungefähr) empfangenen Belichtung wächst, aber anderseits mit dem Alter abnimmt. Die dargestellte Beziehung erlaubt anscheineud eine gute Tätigkeits aufnahme der alten Blätter, die nach Ausdünnung einem erhöhten Lichtenfall augesetzt wurden.

Die Blatteigenschaften (optische Eigenschaften, Gehalt an Chlorophyll, Flächenmasse, Dicke, Dichte und Stomataindex) ändern in sich je nach der Behandlung, aber können nicht die beobachteten Differenzen in der Photosynthese erklären.

РЕЗЮМЕ

Использование солнечной энергии культурой вигны (*Vigna sinensis*). — IV. Влияние возраста и условий пред'идущих освещений на фотосинтетический потенциал семядольных листков.

Р. БОНОММ, К. ВАРЛЕ-ГРАНШЕ, М. ШАРТЬЕ, П. АРТИС.

Измерение случайных излучений на семядольных листках вигны проведено было в природных условиях, при разных плотностях посева, с затенением, и без него. Оказывается, что фотосинтетический потенциал листьев, в данном случае — Pn Max (ступень кривой чистый фотосинтез — освещение), увеличивается при применении в течении нескольких пред'идущих дней (приблизительно 10-ти) усиленного освещения, но находится одновременно в обратно-пропорциональной зависимости от возраста растения. Найденное соотношение позволяет хорошую симуляцию возобновления активности взрослых листьев подвержшихся усилению случайных излучений после прореживания.

Листовые характерности (оптические свойства, содержание хлорофилла, поверхностная масса, толщина, плотность и стоматический показатель) изменяются в зависимости от обработок, но не об'ясняют наблюдавшиеся различия фотосинтеза.

Références bibliographiques

BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., ARTIS P., 1974. Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. II. Assimulation nette et accroissement de matière sèche, influence du phototropisme sur la photosynthèse des premières feuilles. *Ann. agron.*, **25** (1) 49-60.

BOURDU R., PRIOUL J.-L., 1974. Réponses photosynthétiques de type adaptatif aux climats lumineux de croissance : étude théorique, application et diagnostic précoce. *Physiol. Vég.*, **12** (1), 35-51.

CHARTIER P., 1966. Etude théorique de la photosynthèse brute de la feuille. *Ann. Physiol. Vég.*, **8**, 167-196.

CHARTIER M., CHARTIER P., 1971. Design of an air conditioned assimilation chamber for detached leaves. *Photosynthetica* **5** (1), 74-75.

COMBRES J.-C., BONHOMME R., BALDY C., GOILLOT C., de PARCEVAUX S,, 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à mesurer le rayonnement sous couvert végétal. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*. I. N. R. A. Paris, 59-70.

CROOKSTON R. K., TREHARNE K. J., LUDFORD P., OZBUN J. L., 1975. Response of beans to shading. *Crop science*, **15,** 412-416.

HODANOVA D., 1975. Specific leaf weight and photosynthetic rate in sugar beet leaves of different age. *Biol. Plantarum*, **17** (4), 314-317.

KOLLER H. R., NYQUIST W. E., CHORUSH I. S., 1970. Growth analysis of the soybean Community. *Crop science*, **10** (4), 407-412.

MACKINNEY G., 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal biol. Chem.*, **140,** 315-322.

PEARCE R. B., LEE D. R., 1969. Photosynthetic and Morphological adaptation of alfalfa leaves to light intensity at different stages of maturity. *Crop science*, **9,** 791-794.

PEARCE R. B., CARLSON G. E., BARNES D. K., HART R. H., HANSON C. H., 1969. Specific leaf weight and photosynthesis in alfalfa. *Crop science*, **9,** 423-426.

PRIOUL J.-L., 1971. Réactions des feuilles de *Lolium multiflorum* à l'éclairement pendant la croissance et variation des résistances aux échanges gazeux photosynthétiques. *Photosynthetica*, **5** (4), 364-375.

SCHOCH P. G., 1972. Variation de la densité stomatique de *Capsicum annuum* en fonction du rayonnement global. *C. R. Acad. Sci.*, **274,** série D, 2496-2498.

SCHOCH P. G., 1974. Reprise d'activité des premières feuilles de *Vigna sinensis* à la suite de défoliations. *Physiol. Vég.*, **12** (2), 289-298.

SCHOCH P. G., SANTOS CANDELARIO L., 1974. Influencia de la sombra sobre et crecimiento y la productividad de las hojas de *Vigna sinensis* L. *Turrialba*, **24** (1), 84-89.

SINCLAIR R., THOMAS D. A., 1970. Optical properties of leaves of some species in Arid South Australia. *Aust. J. Bot.*, **18,** 261-273.

SESTAK Z., CATSKY J., 1967. Sur les relations entre le contenu en chlorophylle et l'activité photosynthétique pendant la croissance et le vieillissement des feuilles. In : Sironval C., Ed. *Le chloroplaste, croissance et vieillissement*, Masson. 213-262.

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., 1974. Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. III. Evolution du rendement énergétique pendant la phase végétative. *Ann. agron.*, **25** (6), 811-819.

WOLEDGE J., 1971. The effect of light intensity during growth on the subsequent rate of photosynthesis of leaves of tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Ann. Bot.*, **35**, 311-322.

Ann. agron., 1977, **28** (2), 171-183.

Porosité racinaire et tolérance à l'ennoyage

M. MINGEAU

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
12, Avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand

Résumé

La mesure de la porosité racinaire a été utilisée pour apprécier les possibilités d'adaptation morphologique de plantes (maïs et fétuque élevée) soumises à un ennoyage dès la germination.

Lorsque les disponibilités en oxygène du milieu diminuent, le volume des espaces lacunaires dans la racine (exprimé par la porosité racinaire) augmente et donc, par hypothèse, le transfert interne d'oxygène des parties épigées aux racines.

Cette voie adaptative joue un rôle compensateur par rapport à l'insuffisance d'oxygénation du substrat et permet le maintien d'un « plancher » minimum de respiration qui se situe à un niveau plus ou moins proche de la valeur normale suivant le végétal étudié.

Introduction

Dans la nature, les végétaux présentent des comportements très divers vis-à-vis de l'excès d'eau et de la mauvaise aération du sol. De nombreuses plantes aquatiques et des marais poussent dans des habitats humides même lorsque la disponibilité de l'oxygène est faible (Williams et Barber, 1961) ; par contre, la plupart des espèces et, entre autres les plantes cultivées, sont incapables de croître dans des sols ennoyés ; certaines montrent une grande sensibilité aux phénomènes d'asphyxie radiculaire même de courte durée (Van't Woudt et Hagan, 1957 ; Letey *et al.*, 1962).

Ces comportements extrêmes posent évidemment le problème du ou des mécanismes responsables ; les nombreux travaux effectués depuis une vingtaine d'années permettent de formuler deux hypothèses :

— La 1re repose sur le fait qu'une partie de l'oxygène nécessaire à la respiration racinaire pourrait diffuser dans les espaces lacunaires remplis de gaz (aérenchymes) depuis les parties aériennes jusqu'aux racines. Suivant les auteurs, cette « adaptation morphologique » assurerait un transfert interne d'oxygène suffisant pour les plantes en début de croissance (Greenwood, 1967), ou pour maintenir la survie cellulaire (Geisler, 1965). En fait, si dans certains cas, l'apport d'oxygène aux racines par la voie interne s'avère possible, d'autres observations apportent des conclusions plus restrictives (Freed *et al.*, 1965 ; Coult, 1964 ; Kramer, 1951).

— la 2e hypothèse fait intervenir une possibilité « d'adaptation métabolique » du végétal ; cet aspect a été étudié par Crawford et son équipe dont les travaux récents ont conduit à l'élaboration d'une théorie métabolique (Crawford 1967, 1969 ; Crawford et Tyler, 1969 ; MacManmon et Crawford, 1971).

L'objectif de cet essai est d'observer les effets d'un ennoyage imposé dès la germination sur la morphologie des racines et de discuter la relation éventuelle entre les modifications trouvées au niveau racinaire et le comportement en croissance de deux plantes, maïs et fétuque élevée, cette dernière ayant été choisie du fait de sa bonne résistance à l'ennoyage.

Nous avons utilisé la mesure de la porosité racinaire (volume d'espaces gazeux par unité de volume de racines) comme indication de la possibilité de transfert de l'oxygène des parties aériennes jusqu'aux racines, celles-ci constituant le niveau de résistance maximum à la diffusion de l'oxygène.

Méthodes expérimentales

Pour éviter les nombreuses interférences dues aux cultures sur sol, nous avons choisi un milieu de culture simple : une solution nutritive avec support solide poreux (fig. 1).

Les plantes sont placées dans une enceinte climatisée réalisant les caractéristiques suivantes :

— température jour : 24 °C ± 1 °C
— — nuit : 16 °C ± 1 °C

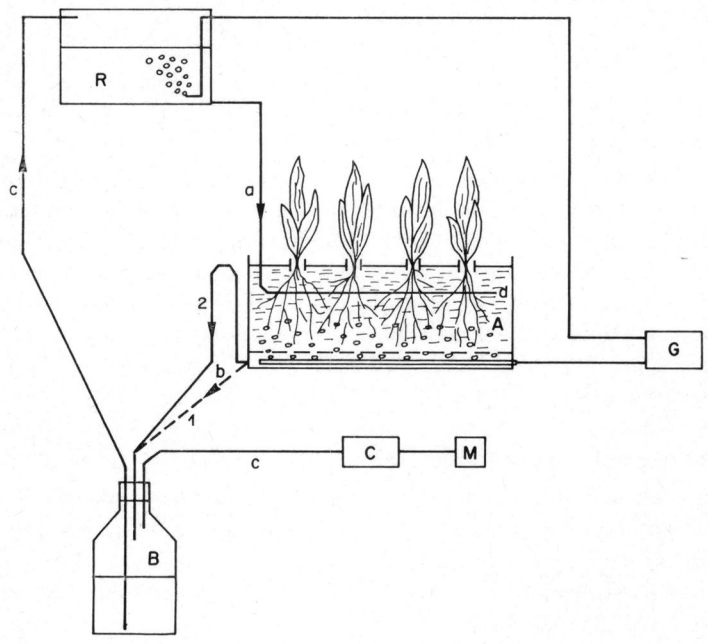


FIG. 1. — *Dispositif de culture.*

L'alimentation en solution (environ 1l/10 mn) du bac de culture (A) est réalisée au moyen de la rampe d'arrosage (*d*) ; la solution nutritive est ensuite évacuée (*b*) soit par drainage libre (1), soit par trop-plein (2) vers le bidon de récupération (B). Le recyclage (*c*) de la solution sous pression (compresseur C) s'effectue toutes les 20 mn (minuterie M) vers la réserve de solution (R), *b* étant muni d'une valve anti-retour.

Un barbotage d'air ou d'azote (G) sous débit contrôlé est maintenu dans le bac de culture et la réserve de solution.

— humidité relative jour : 55 p. 100 ± 2 p. 100
— — — nuit : 70 p. 100 ± 2 p. 100
— éclairement 14.000 lux.

Traitements

Nous avons postulé au départ la recherche d'un effet de l'ennoyage seul sur la morphologie racinaire par comparaison avec l'effet d'une carence totale en oxygène dans les mêmes conditions d'ennoyage. En réalité, nous avons bien obtenu deux conditions d'oxygénation distinctes mais encore nettement insuffisantes pour assurer une diffusion d'oxygène convenable, y compris lorsque nous avons aéré notre milieu ennoyé. En définitive, nous aurons à comparer trois niveaux d'oxygénation définissant les trois traitements suivants :

— TE = Témoin (milieu bien aéré avec libre diffusion en phase gazeuse),
— ENA = Ennoyage avec aération de la solution,
— ENN = Ennoyage avec barbotage d'azote dans la solution.

En cours de végétation, nous avons effectué quelques contrôles de la pression partielle d'oxygène des milieux avec une sonde polarographique Beckman (teneur moyenne de 12,5 p. 100 pour ENA et 3,5 p. 100 pour ENN). En fait, ces valeurs constituent des indications très approximatives de l'oxygénation réelle des racines car elles ne représentent que sa caractéristique statique. En effet, les conditions d'oxygénation au niveau racinaire résultent d'un processus dynamique pouvant se caractériser par la vitesse de consommation de l'oxygène à ce niveau et la vitesse de diffusion de l'oxygène vers ces sites. La concentration mesurée à quelque distance des racines est une image surestimée de la concentration réelle au point de consommation.

Plantes testées. Durée des traitements

— Maïs L. G. 11 : du début de la germination au stade 8e feuille (24 jours).
— Fétuque élevée Clarine : 25 jours à partir de la germination.

Détermination de la porosité racinaire

Nous avons utilisé la méthode pycnométrique proposée par Jensen *et al.* (1969) ; les pesées suivantes sont effectuées successivement :

P_i = échantillon de racines intactes,
P_{i+p} = racines intactes + pycnomètre + eau,
P_{b+p} = racines broyées + pycnomètre + eau,
P_p = pycnomètre + eau.

Si V = volume total des racines de l'échantillon
et v = volume total des espaces lacunaires,

nous pouvons écrire les égalités :

$$P_{i+p} = P_i + P_p - V\rho \qquad \text{avec } \rho = \text{densité de l'eau} \qquad (1)$$

$$P_{b+p} = P_{i+p} + v\rho \qquad (2)$$

De (1) et (2), nous tirons :

$$V = \frac{P_i + P_p - P_{i+p}}{\rho}$$

$$v = \frac{P_{b+p} - P_{i+p}}{\rho}$$

La porosité racinaire peut alors se calculer d'après la formule :

$$\text{Porosité (p. 100)} = 100 \cdot \frac{v}{V} = \frac{P_{b+p} - P_{i+p}}{P_i + P_p - P_{i+p}} \cdot 100$$

Résultats

I. — *Maïs*

1.1. *Croissance.*

Après une dizaine de jours d'ennoyage, avec ou sans aération de la solution nutritive, des striures jaunes apparaissent sur les parties aériennes et ce jaunissement se maintient jusqu'à la fin des traitements. On observe un ralentissement de la croissance des plantes traitées comme l'indique l'évolution des hauteurs maximales moyennes des parties aériennes (fig. 2). Au stade de développement atteint au moment

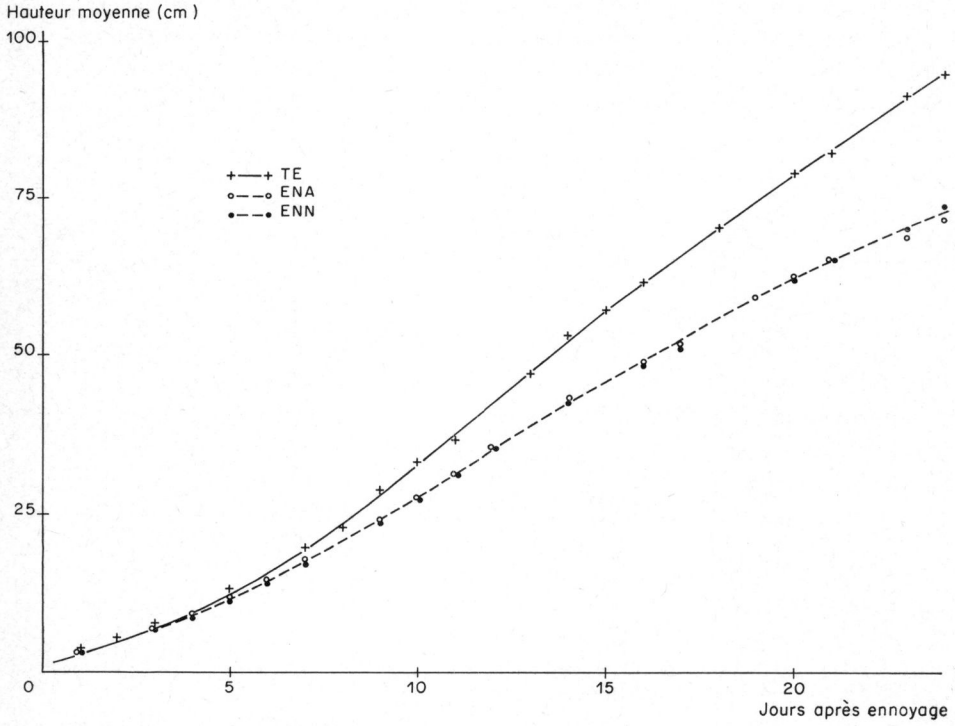


FIG. 2. — *Maïs. Evolution de la hauteur maximale moyenne (en cm) des parties aériennes au cours de l'ennoyage.*

des contrôles (8e feuille dans cornet), aucune autre différence notable ne peut être mise en évidence entre les maïs ennoyés, que le milieu soit oxygéné ou non. Cette observation se trouve confirmée par les résultats pondéraux enregistrés à la récolte des plantes (tabl. 1).

TABLEAU 1

Maïs. Matière sèche à la récolte en g/bac (8 plantes)

Traitements	Parties aériennes	Racines			M. S. totale
		∅ > 1 mm	∅ < 1 mm	Total	
TE	18,19	1,05	1,93	2,98	21,16
ENA	11,20	0,40	1,55	1,95	13,15
ENN	11,54	0,44	1,51	1,95	13,49

Le déficit de production en matière sèche totale par rapport au témoin (de l'ordre de 37-38 p. 100) est réparti de façon à peu près identique entre les parties aériennes et les racines.

La différence la plus sensible se situe au niveau de l'aspect et de la morphologie du système radiculaire :

— traitement ENA : répartition dans toute la masse du sable, racines longues moyennement ramifiées, quelques-unes de diamètre > 1 millimètre sans ramification.

— traitement ENN : concentration dans les cinq premiers centimètres, racines courtes et ramifiées, grosses racines plus nombreuses que dans le traitement précédent.

1.2. *Porosité racinaire.*

Nous avons séparé les racines en deux parties en fonction de leur diamètre et de leur ramification :

— diamètre > 1 millimètre : racines coronaires et non ramifiées ;

— diamètre < 1 millimètre : racines primaires ramifiées.

Les déterminations de porosité racinaire sont effectuées sur deux séries de quatre échantillons, soit huit répétitions pour chaque lot. La moyenne pondérée pour l'ensemble des racines se calcule d'après la répartition en matière fraîche des deux fractions considérées.

TABLEAU 2

Maïs. Porosité racinaire (en p. 100)

Traitements	Racines ∅ > 1 mm	Racines ∅ < 1 mm	Moyenne pondérée
TE	9,72	4,69	6,15
ENA	9,73	8,27	8,53
ENN	9,91	12,67	12,11

Les valeurs données au tableau 2 indiquent que :

— une partie du système radiculaire (diamètre > 1 millimètre) possède une porosité indépendante des conditions particulières de milieu (ennoyage, aération) ;

— pour les racines primaires ramifiées, *la porosité croît fortement lorsque les disponibilités en oxygène du milieu de culture diminuent* (Por. ENN ⩾ Por. ENA ⩾ Por. TE) ; compte tenu de l'importance du système primaire à ce stade de végétation, cette observation s'avère également valable au niveau de la valeur moyenne pour l'ensemble du système radiculaire.

Ces données se trouvent en accord avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (Luxmoore *et al.*, 1971 ; Das et Jat, 1972 ; Yu *et al.*, 1969 ; Troughton, 1972) ; elles semblent indiquer qu'en conditions d'excès d'eau et de manque d'oxygène, une certaine atténuation de l'asphyxie pourrait intervenir par augmentation des possibilités de transfert interne de l'oxygène.

II. — *Fétuque*

2.1. *Croissance.*

Pendant l'application des traitements (25 jours), nous n'avons noté aucune différence sensible de croissance entre les traités et le témoin. Le seul symptôme externe visible a été l'apparition, après une semaine d'ennoyage, d'une coloration vert jaunâtre à la base des feuilles, mais, par la suite, ce jaunissement ne s'est pas maintenu.

Seuls les contrôles à la récolte permettent d'évaluer l'incidence des traitements sur la croissance et les caractéristiques morphologiques des racines. Les premières différences apparaissent lors de l'examen des systèmes radiculaires :

— TE : racines de couleur blanc-beige, longueur moyenne 10 à 12 centimètres ;

— ENA : racines blanches, fines et ramifiées, de longueur à peu près identique au témoin (9 à 11 centimètres), avec une certaine proportion d'un diamètre plus important, non ramifiées et plongeantes ;

— ENN : racines très fines, ramifiées et courtes (5 à 6 centimètres), avec également des racines plus grosses, non ramifiées et plongeantes.

Les résultats concernant la matière sèche produite sont donnés pour 100 plantes (tabl. 3). Ce mode de calcul permet d'éliminer l'inévitable hétérogénéité initiale de peuplement entre bacs mais cache également l'influence des traitements sur le nombre

TABLEAU 3

Fétuque élevée. Contrôles à la récolte
(La M. S. est exprimée en g/100 plantes)

Traitements	Parties aériennes		Racines		M. S. totale
	Hauteur (cm)	M. S.	Longueur (cm)	M. S.	
TE	35,0	3,16	10-12	0,46	3,62
ENA	33,5	2,92	9-11	0,35	3,27
ENN	33,0	3,01	5-6	0,36	3,37

de plantes développées (diminution de 12 à 15 p. 100 pour ENA et ENN traduisant une difficulté d'implantation du végétal).

L'ennoyage, avec ou sans aération, affecte davantage la croissance des racines (réduction de 24 et 22 p. 100) que celle des parties aériennes (8 et 5 p. 100) mais ne pénalise que très modérément la matière sèche totale (10 p. 100 au maximum), ce qui est en concordance avec le bon comportement de la fétuque élevée dans les zones humides.

2.2. *Porosité racinaire.*

La tendance déjà signalée dans le cas du maïs se confirme pour la fétuque avec une porosité racinaire croissante lorsque les conditions du milieu limitent l'approvisionnement en oxygène au niveau des racines (tabl. 4).

TABLEAU 4

Fétuque élevée. Porosité racinaire (p. 100)

Traitements	Porosité racinaire (p. 100)
TE	1,98
ENA	3,94
ENN	6,05

Les faibles quantités de racines récoltées n'ont pas permis d'effectuer des déterminations séparées sur les deux fractions du système radiculaire décrites plus haut. Ce fait est évidemment regrettable car nous aurions pu corréler une morphologie grossière avec le critère de porosité choisi. Cependant, nous avons des mesures sur les relations morphologie/porosité obtenues au cours d'essais antérieurs montrant qu'aux deux morphologies distinctes, racines fines et ramifiées (type 1) d'une part, racines plus épaisses, non ramifiées et plongeantes (type 2) d'autre part, correspondent des porosités variant de 1 à 3.

On peut remarquer que le nombre de racines de type 2 augmente sous l'effet de l'ennoyage mais leur proportion reste beaucoup trop faible pour expliquer l'énorme variation de porosité observée sur l'ensemble et nous devons nécessairement présumer d'une augmentation conséquente de la porosité des racines de type 1, phénomène déjà mesuré dans le cas du maïs.

Remarque.— Les valeurs de porosité racinaire obtenues pour les deux espèces testées indiquent une augmentation, en valeur relative, plus importante chez la fétuque (tabl. 5), mais, par contre, la porosité maximale de cette espèce (6,05 p. 100) est à peine égale à la porosité minimale du maïs (6,15 p. 100). Cette constatation devrait normalement se traduire par une meilleure adaptation du maïs à l'anoxie ; or, nous venons de voir que la comparaison des comportements en croissance s'avère favorable à la fétuque.

En fait, l'efficacité réelle de la porosité racinaire ne dépend pas uniquement de sa valeur absolue, mais elle est conditionnée par un certain nombre d'éléments

(sinuosité des espaces lacunaires, perméabilité des membranes, barrières à la diffusion d'oxygène, non-continuité des lacunes au niveau des méristèmes...) variables d'une espèce à l'autre et allant dans le sens d'une réduction des possibilités de transfert de l'oxygène (Bryant, 1934 ; Evans et Ebert, 1960 ; Barber *et al.*, 1962).

Discussion

Les résultats obtenus sur les deux plantes testées indiquent une identité de comportement dans les relations entre l'oxygénation du milieu et la porosité racinaire. Les conditions imposées au cours de ces essais (drainage libre, ennoyage avec aération, ennoyage avec barbotage d'azote) permettaient d'obtenir trois niveaux différents de concentration d'oxygène au niveau des racines. A cette gamme décroissante des disponibilités en oxygène, la plante a répondu par une augmentation du volume des espaces lacunaires dans la racine et donc, par hypothèse, des possibilités de transfert interne de l'oxygène, phénomène confirmant certaines observations récentes (Yu *et al.*, 1969 ; Varade *et al.*, 1970 ; Pradhan *et al.*, 1973).

Cette adaptation identique du végétal sur le plan de sa morphologie racinaire ne se traduit cependant pas par un comportement en croissance de même ordre. Le maïs, malgré une porosité racinaire nettement augmentée, montre une tolérance faible et subit une réduction importante de sa croissance ; au contraire, la fétuque élevée ne paraît pas souffrir dans des conditions semblables et le déficit de production relevé reste très limité.

D'une façon générale, l'adaptation morphologique et les possibilités de transfert qu'elle procure semblent jouer un rôle compensateur par rapport à l'insuffisance d'oxygénation du substrat, mais cette compensation se situerait à un niveau plus élevé dans le cas de la fétuque (tabl. 5) permettant ainsi le maintien d'une activité métabolique plus proche de la normale.

TABLEAU 5

Niveau relatif de porosité racinaire

Traitements	Maïs	Fétuque élevée
TE	1,0	1,0
ENA	1,38	1,99
ENN.....	1,97	3,06

Nous observons, par ailleurs, que les conditions d'oxygénation réduites (ENA et ENN) ne se distinguent pas entre elles par leur résultante sur la croissance, aussi bien pour le maïs (38 et 36 p. 100 de réduction par rapport au témoin) que pour la fétuque (10 et 7 p. 100). Par contre, nous venons de voir que, pour ces deux cultures, les porosités racinaires sont étroitement reliées, de façon inverse, au niveau d'oxygénation. Tout se passe comme si le processus compensatoire introduit, manifeste dans les deux cas mais nettement plus fort pour la fétuque, s'établissait de telle sorte qu'un

« plancher » minimum de fonctionnement respiratoire soit assuré. Ce plancher se situerait à un niveau très proche de la valeur normale dans le cas de la fétuque élevée alors qu'il en est plus éloigné dans le cas du maïs. Le déroulement du mécanisme est identique dans les deux cas étudiés, mais les niveaux sont différents.

Nous appuyant sur ces différentes observations et considérant *a priori* que la modification de porosité est le seul mécanisme adaptatif en cause (hypothèse « simplificatrice »), nous pouvons tenter d'évaluer la part relative revenant, dans la respiration totale, à la voie externe (oxygène venant du milieu) et à la voie interne (transfert d'oxygène des parties aériennes aux racines).

Pour ce faire, nous formulons les hypothèses suivantes :

— la matière sèche produite (P) est proportionnelle à la respiration totale des racines (R), soit $R = k.P$; la matière sèche rapportée à la matière sèche du témoin constitue ainsi un indice de respiration ;

— le transfert d'oxygène issu des parties épigées ou la respiration entretenue par ce transfert (R_i) est proportionnel à la porosité (x), soit $R_i = a.x$;

— la respiration entretenue par l'oxygène du milieu (R_e) est nulle en conditions d'ennoyage avec barbotage d'azote (ENN).

Cet ensemble d'hypothèses permet d'écrire :

1) $\frac{R}{R_T} = \frac{P}{P_T}$ = indice de respiration globale (r) par rapport au témoin dont les valeurs peuvent être calculées directement :

	Maïs	Fétuque
r — TE	1	1
r — ENA	0,62	0,90
r — ENN.....	0,64	0,93

2) $R = R_i + R_e$ et $\frac{R}{R_T} = \frac{R_i}{R_T} + \frac{R_e}{R_T}$

dans laquelle R_i (voie interne) $= a.x$

L'équation prend alors la forme :

$$\frac{P}{P_T} = \frac{a.x}{k.P_T} + \frac{R_e}{k.P_T}$$

Sachant que R_e (voie externe) $= 0$ pour le traitement ENN, on peut écrire :

$$\frac{P_{ENN}}{P_T} = \frac{a}{k} \cdot \frac{x_{ENN}}{P_T}$$

et

$$\frac{a}{k} = \frac{P_{ENN}}{x_{ENN}}$$

$\frac{a}{k} = 1{,}114$ pour le maïs et 0,557 pour la fétuque.

$r_i = \frac{ax}{k.P_T}$ et $r_e = r - r_i$ prennent les valeurs suivantes :

	Maïs			*Fétuque*		
	TE	ENA	ENN	TE	ENA	ENN
r_i	0,32	0,45	0,64	0,30	0,61	0,93
r_e	0,68	0,17	0	0,70	0,29	0

Leur examen indique tout d'abord que le transfert interne d'oxygène assure pour les deux plantes 30 p. 100 de la respiration totale en conditions saines. Cette valeur est à rapprocher de celle trouvée par Luxmoore (1970) dans une étude simulant les conditions de plein champ ; il montre qu'au moins 25 p. 100 de l'oxygène consommé par la respiration racinaire du maïs est apporté par diffusion dans les tissus à partir de l'atmosphère.

Cependant, chez le maïs, la possibilité de transfert interne évolue plus lentement (32 à 64 p. 100 de la respiration du témoin) avec l'anoxie que chez la fétuque (30 à 93 p. 100) ; ensuite il apparaît que la respiration à partir de l'oxygène du milieu racinaire chute plus rapidement chez le maïs que chez la fétuque en anoxie croissante. Ces deux observations entraînent évidemment une diminution plus importante de la respiration totale dans le cas du maïs (fig. 3).

En considérant maintenant le gain de respiration par transfert (Δr_i), nous voyons qu'en ennoyage seul, chez le maïs, il compense 25 p. 100 de la réduction de respiration sur l'oxygène du milieu (Δr_e) contre 75 p. 100 pour la fétuque ; en ennoyage avec barbotage d'azote, les taux de compensation ($\Delta r_i/\Delta r_e$) atteignent respectivement 47 et 90 p. 100.

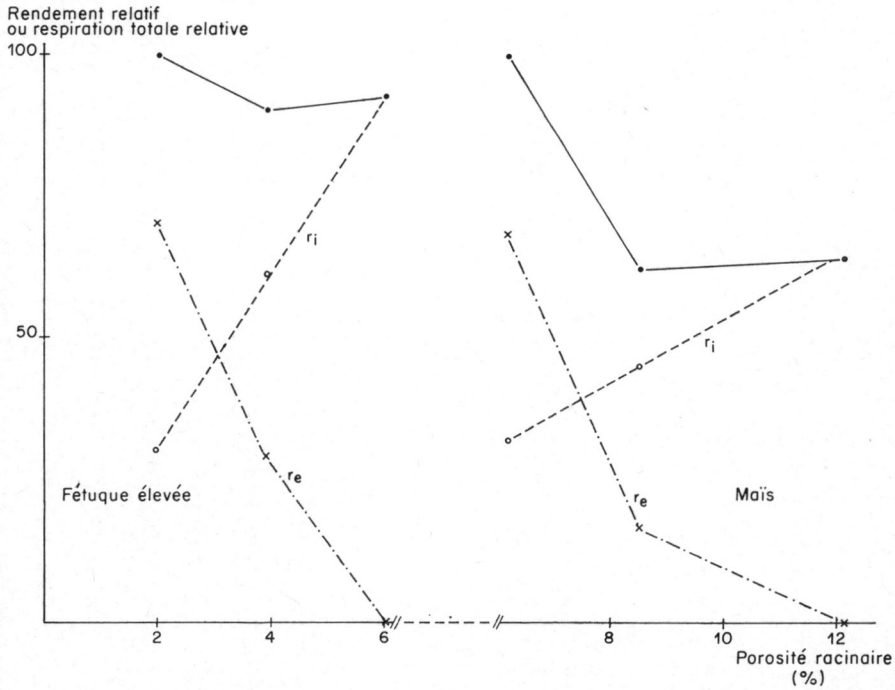


FIG. 3. — *Relation entre la porosité racinaire et la respiration totale (ou le rendement).* Participation de la respiration par transfert d'oxygène (r_i) et à partir de l'oxygène du milieu (r_e) dans la respiration totale.

Conclusion

La porosité racinaire, non négligeable en conditions normales, est susceptible d'évoluer dans un sens favorable au transfert d'oxygène issu des organes aériens lorsque les conditions d'oxygénation du milieu se dégradent.

Cette possibilité est variable selon l'espèce, plus forte dans notre essai pour la fétuque que pour le maïs ; il est cependant vraisemblable que ce mécanisme d'adaptation ne pourra jouer que si la contrainte se manifeste au cours de l'élaboration des structures racinaires.

Nous appuyant sur les corrélations existant entre la porosité racinaire et son évolution et le comportement en croissance, nous avons tenté de quantifier le rôle relatif de ce mode d'approvisionnement en oxygène ; dans le cas de la fétuque, il pourrait atteindre 90 p. 100 de la respiration normale lorsque cette plante est placée sur un substrat désoxygéné.

Cette tentative comporte cependant des hypothèses simplificatrices éliminant en particulier d'autres mécanismes adaptatifs susceptibles d'expliquer les mêmes différences de comportement. Ainsi, les modifications observées dans l'évolution des teneurs en acides organiques des racines, en particulier l'acide malique, fournissent une interprétation par voie métabolique (MacManmon et Crawford, 1971 ; Duthion, 1976) ; de même, les variations de l'activité de la nitrate réductase suggèrent une possibilité de substitution du substrat d'oxygénation.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Root porosity and tolerance to water excess

The measuring of root porosity was used so as to estimate the morphological adaptability of plants (maize and elevated fescue) submitted to water excess from the very germination.

When the available oxygen of the environment decreases, the volume of the lacunas in root (expressed as root porosity) increases and as a consequence the inward transfer of oxygen from the epigeous parts to the roots may be assumed to increase also.

This way of adaptation plays a compensating role with regard to the insufficient oxygenation of the substrate and enables to maintain a minimum respiration level which is more or less close to the normal value according to the plant studied.

Zusammenfassung

Wurzelduchlässigkeit und Toleranz des Wasserüberschusses

Das Messen der Wurzeldurchlässigkeit wurde gebraucht, um die morphologischen Anpassungsfähigkeiten von Pflanzen zu bewerten, die von der Keimung an einem Wasserüberschuss unterworfen werden (Mais und Festuca).

Wenn der verfügbare Sauerstoff der Umwelt abnimmt, nimmt das (als Wurzeldurchlässigkeit ausgedrückte) Hohlraumvolumen in der Wurzel zu, und dasselbe kann von der inneren Sauerstoffübertragung von den Aussenteilen nach den Wurzeln angenommen werden.

Dieser Anpassungsweg spielt eine Ausgleichsrolle im Hinblick auf die ungenügende Sauerstoffanreicherung des Substrats und ermöglicht das Erhalten einer Mindestatmungsschwelle, die sich je nach der studierten Pflanze dem normalen Wert mehr oder weniger nähert.

РЕЗЮМЕ

Корневая порозность и толерантность к затоплению.

М. МЕНЖО.

Измерение корневой порозности применялось для оценки возможностей морфологической адаптации растений (кукуруза и овсяница) с прорастания подверженных затоплениям.

При уменьшении наличности кислорода в среде, увеличивается об'ем промежуточных пространств в корне (выражающийся корневой порозностью), что, по гипотезе автора, вызывает усиление внутреннего перемещения кислорода из надземных частей ростка к корням.

Этот адаптативный путь играет роль компенсатора недостаточности кислорода в субстрате, и позволяет поддержать минимальный уровень дыхания, более или менее близкий к кормальному, в зависимости от изучаемого растения.

Références bibliographiques

BARBER D. A., EBERT M., EVANS N. T. S., 1962. The movement of ^{15}O through barley and rice plants. *J. Exp. Bot.*, **13,** 397-403.

BRYANT A. E., 1934. Comparison of anatomical and histological differences between roots of barley grown in aerated and non-aerated culture solutions. *Plant Physiol.*, **9,** 389-391.

COULT D. A., 1964. Observations on gas movement in the rhizome of *Menyanthes trifoliata* L. with comments on the role of the endodermis. *J. Exp. Bot.*, **15,** 205-218.

CRAWFORD R. M. M., 1967. Alcohol dehydrogenase activity in relation to flooding tolerance in roots. *J. Exp. Bot.*, **18,** 458-464.

CRAWFORD R. M. M., 1969. The physiological basis of flooding tolerance. *Ber. Dtsch. Bot. Ges. Bd.*, **82,** 111-114.

CRAWFORD R. M. M., TYLER P. D., 1969. Organic acid metabolism in relation to flooding tolerance in roots *J. Ecol.*, **57,** 237-246.

DAS D. K., JAT R. L., 1972. Adaptability of maize to high soil water conditions. *Ag. Jal.*, **64,** 849-850.

DUTHION C., 1976. Variations des teneurs en acides organiques des racines soumises à un excès d'eau. *Ann. agron.*, **27** (2), 207-220.

EVANS N. T. S., EBERT M., 1960. Radioactive oxygen in the study of gas transport down the root of *Vicia faba*. *J. Exp. Bot.*, **11**, 246-257.

FREED M., TENSHO K., ZSOLDOS F., 1965. Effect of reduced oxygen tension on the uptake of inorganic ions by rice and barley. *Isotopes and radiation in soil plant nutrition studies*, 233-240.

GEISLER G., 1965. The morphogenetic effect of oxygen on roots. *Plant physiology*, Lancaster, 40-85.

GREENWOOD D. J., 1967. Studies on the transport of oxygen through the stems and roots of vegetable seedlings. *New Phytol.*, **66,** 337-347.

JENSEN C. R., LUXMOORE R. J., GUNDY S. D., STOLZY L. H., 1969. Root air space measurement by a pycnometer method. *Ag. Jal.*, **61,** 474-475.

KRAMER P. J., 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding on the soil. *Plant physiol.*, **26,** 722-736.

LETEY J., STOLZY L. H., BLANK G. B., 1962. Effect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. *Ag. Jal.*, **54,** 34-37.

LUXMOORE R. J., STOLZY L. H., LETEY J., 1970. Oxygen diffusion in the soil-plant system. III. Oxygen concentrations profiles, respiration rates, and the significance of plant aeration predicted for maize roots. *Ag. Jal.*, **62,** 325-329.

LUXMOORE R. J., SOJKA R. E., STOLZY L. H., 1971. Root porosity and growth responses of wheat to aeration and light intensity. *Soil Sci.*, **113** (5), 354-357.

MACMANMON M., CRAWFORD R. M. M., 1971. A metabolic theory of flooding tolerance : the significance of enzyme distribution and behaviour. *New Phytol.*, **70,** 299-306.

PRADHAN S. K., VARADE S. B., KAR S., 1973. Influence of soil water conditions on growth and root porosity of rice. *Plant and Soil*, **38,** 501-507.

TROUGHTON A., 1972. The effect of aeration of the nutrient solution on the growth of *Lolium perenne*. *Plant and Soil*, **36,** 93-108.

VAN'TWOUDT B. D., HAGAN R. M., 1957. Crop responses to excessively high soil moisture levels. *Agronomy*, VIII, 514-578.

VARADE S. B., LETEY J., STOLZY L. H., 1970. Crop adaptation to high soil-water content. *Calif. Agr.* **24** (2), 15.

WILLIAMS W. T., BARBER D. A., 1961. The functionnal significance of aerenchyme in plants. *Soc. exp. Biol. Symp.*, **15,** 132-154.

YU P. T., STOLZY L. H., LETEY J., 1969. Survival of plants under prolonged flooded conditions. *Ag. Jal.* **61,** 844-847.

Ann. agron., 1977, **28** (2), 185-213.

Morphologie de la touffe et croissance de *Nardus stricta* L. Influence de la pâture et de la fauche

P. LOISEAU

avec la collaboration technique de G. MERLE

Station d'Agronomie, Centre de Recherches de Clermond-Ferrand, I.N.R.A., 63100 Clermond-Ferrand

Résumé

Cette étude est conçue dans un but d'amélioration des pâturages d'altitude par éradication de *Nardus stricta* L., espèce refusée par le bétail.

La connaissance de la morphologie et de la croissance constituent un préalable à une analyse *in situ* du comportement de la touffe sous différents traitements agronomiques de pâture et de fauche. L'existence d'une phase critique dans le cycle de reproduction végétative permet de préciser et de localiser dans le temps les interventions de l'agriculteur qui ont le plus de chances d'aboutir à un affaiblissement du Nard.

Introduction

Le Nard (*Nardus stricta* L.) est une graminée pérenne que le refus par le bétail rend extrêmement gênante dans les pâturages d'altitude, et qui peut représenter jusqu'à 80 p. 100 de la productivité primaire annuelle des parcours montagnards.

Alors que dans les étages subalpins et alpins, l'écologie des Nardaies est essentiellement liée au climat (Nardaies climaciques), dans les étages collinéens et montagnards, elle est déterminée par la conduite du troupeau, ainsi que l'a montré Klapp (1950) en Allemagne entre 400 et 1 000 mètres d'altitude (Nardaies anthropiques). Il en est de même des Nardaies des Monts d'Auvergne entre 800 et 1 500 mètres d'altitude (Luquet, 1926 ; de Montard et Gachon, 1976).

La nature agronomique du problème ne fait donc pas de doute ; son importance tient à l'extension considérable des Nardaies dans les zones montagnardes européennes à vocation pastorale.

Brynmor et Fairbairn (1956) citent pour le Nard une digestibilité de la matière organique de 62 p. 100 en juin. Plutôt que la valeur nutritive, c'est plutôt l'appétibilité qui semble être à l'origine du refus : les spicules de silice qui incrustent les feuilles rebutent les animaux en agissant sur leur sens du toucher (Loiseau et Bechet, 1975).

Il n'existe pas actuellement de désherbant sélectif du Nard. Les autres moyens de lutte étudiés jusqu'à nos jours emploient à la fois de fortes fertilisations minérales et

l'exploitation en fauche qui sont exclues la plupart du temps dans les zones montagnardes pour des raisons d'accès, de main-d'œuvre et de rentabilité. La fumure organique, bien que très efficace (Ludi, 1941 ; Delpech, 1975), n'est pas facilement praticable ; la technique traditionnelle de parcage (Saint Chamant, 1956) qui apporte une solution au problème du transport des fumiers, est en voie d'abandon pour des questions de main-d'œuvre. A plus forte raison, le retournement et le semis (Lidtke et Mikolajczak, 1972 ; Niedermaier, 1972), ne sont envisageables que de façon exceptionnelle, et sur de petites surfaces.

Dans ces conditions, 2 voies de recherche restent possibles : la 1re consiste à rendre le Nard plus appétant et à choisir le type d'animal le moins délicat capable de le pâturer ; les équidés seraient alors plus favorables que les bovidés, eux-mêmes plus favorables que les ovidés (Hegi, 1935). La 2e consiste à le faire disparaître de la pâture par des pratiques agronomiques simples et peu coûteuses, au profit des espèces les plus productives (le plus souvent, *Agrostis vulgaris* With., *Festuca rubra* L., et, dans les cas les plus favorables, *Trifolium repens* L.).

Dans le but de raisonner les interventions agronomiques conduisant à l'éradication, une étude partielle de la biologie du Nard a été menée en 3 étapes successives. La 1re partie de cette note est consacrée à la description de la touffe et de la disposition des différents organes végétatifs ; la 2e partie est une étude de la croissance végétative sur touffes isolées ; dans la 3e partie, on s'intéressera à l'ensemble du cycle de croissance-développement dans des conditions réelles de compétition intraspécifique et interspécifique sous différents traitements agronomiques.

I. — Observations générales sur la biologie et la morphologie du Nard

Dans ce chapitre, certains points se ramènent à une synthèse et à une discussion bibliographiques ; d'autres sont des renseignements complémentaires issus d'observations personnelles et nécessaires à la présentation du matériel végétal étudié.

1. — *Morphologie générale et strates de la touffe*

Le Nard est une graminée qui se présente sous forme de touffes très serrées, de forme hémisphérique pouvant atteindre 15-20 centimètres de diamètre.

Les parties aériennes, composées des limbes et des tiges florifères, occupent la strate 2-25 centimètres. Sous cette partie chlorophyllienne se trouvent les gaines foliaires sans chlorophylle, hautes de 2 à 4 centimètres et serrées les unes contre les autres en forme de palissade. Les gaines prennent naissance sur un rhizome horizontal court-noué. Elles sont habituellement noyées dans la litière de feuilles sèches provenant des talles mortes des années antérieures. Les racines adventives s'insèrent sur le rhizome et descendent profondément dans le sol (jusqu'à 1,5 mètre).

La strate située au voisinage du sol, composée des gaines et des rhizomes est particulièrement puissante et confère au Nard un avantage dans la compétition avec les autres espèces (Chadwick, 1960). De même, la masse de racines est considérable. Des mesures sur touffes cultivées en pots dans la terre d'origine montrent que la masse de limbes dépasse rarement 30 p. 100 du poids total de la touffe.

2. — *Multiplication et croissance*

Multiplication sexuée.

Le mode de reproduction par semences a été observé sur le terrain par King (1960) après le brûlage d'une Callunaie et il ne fait pas de doute que la reproduction par semis permet à cette espèce de coloniser de nouvelles surfaces. Cependant personne ne cite de resemis sur les Nardaies déjà formées. Ceci pourrait provenir d'une biologie florale anormale (Chadwick).

De fait, nous avons pu constater que le stock de semences viables en réserve dans les sols de Nardaies ne contient qu'une faible proportion de Nard. Avant le départ de la végétation, nous avons récolté sur 2 Nardaies un échantillonnage de mottes de gazon. Le sol retenu par les racines (horizon 0 à 10-15 centimètres), une fois séché à l'air, a été tamisé et mis en terrines. La « pression de semis » d'une espèce est donnée par la proportion de plantules de l'espèce. Comme l'indique le tableau 1, la plus forte pression de semis provient surtout d'autres espèces que le Nard : *Carex caryophyllea* Latourr. dans une Nardaie située à 1 350 mètres d'altitude, et *Festuca ovina* L. dans une Nardaie à 1 000 mètres d'altitude. Des résultats analogues ont été obtenus à partir de terre remontée à la surface du sol par les petits mammifères fouisseurs.

TABLEAU 1

Pression de semis sur 2 nardaies

Pression de semis : proportion de plantules de chaque espèce germant à partir du stock de semences présentes dans le sol.

Alliance phytosociologique : *Nardo galion saxatilis* (Preis. 1949).

1 350 m		1 000 m	
Espèces	p. 100	Espèces	p. 100
Carex caryophyllea Latourr.	57	*Festuca ovina* L.	63
Agrostis vulgaris With.	14	*Nardus stricta* L.	10
Potentilla tormentilla (L.) Necker.	13	*Sagina procumbens* (L.).	10
Luzula campestris L.	3	*Agrostis vulgaris* With.	3
Festuca rubra L.	3	Autres espèces (dicotylédones).	11
Galium hercynicum Weigel.	2		
Calluna vulgaris (L) Hull.	2		
Nardus stricta L.	2		
Autres espèces.	4		

La pérennité des Nardaies est donc assurée par la croissance et la multiplication végétative et c'est ce qu'il convient d'étudier.

Croissance et multiplication végétative.

Comme chez toutes les graminées, la touffe est formée de talles qui s'insèrent sur une tige. Celle-ci est verticale chez la plupart des graminées (plateau de tallage), mais horizontale chez le Nard. Elle constitue un axe souterrain dépourvu de chlorophylle et dont les feuilles sont réduites à des écailles.

Malgré la présence de rhizomes (fig. 1), le Nard est une plante cespiteuse : les nouvelles talles qui apparaissent à l'aisselle des deux premières feuilles, restent serrées les unes contre les autres. Finalement, la plante se présente en touffes compactes qui ont cependant la possibilité de s'étendre et de se déplacer. Chadwick cite des progressions annuelles lentes (2 centimètres) qui s'expliquent par le faible allongement des entrenœuds.

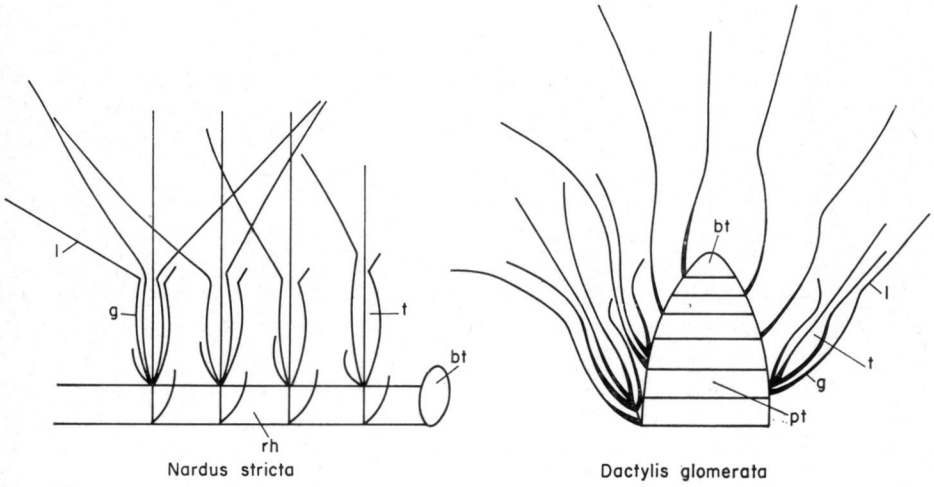


FIG. 1. — *Schéma de la disposition des talles sur* Nardus stricta. *Comparaison avec* Dactylis glomerata. bt : bourgeon terminal ; pt : plateau de tallage ; rh : rhizome; g : gaine ; l : limbe ; t : talle.

Le long d'un rhizome, les talles sont arrangées selon des âges décroissants, la dernière talle faisant office de bourgeon terminal. Le rhizome se ramifie de façon alterne dans la partie la plus ancienne. L'ensemble d'un rhizome et de ses branchements secondaires forme une sous-unité de la touffe que Chadwick appelle « plant ». Dans une touffe vigoureuse, différents « plants » (5 à 10) sont liés entre eux par des tiges rhizomateuses ; la touffe représente donc l'ensemble des ramifications de 1er, 2e et n-ième ordre d'une même plante initiale. Dans un pied âgé, les talles situées dans la partie centrale sont mortes ; les bourgeons croissant vers l'extérieur forment un anneau périphérique de talles vigoureuses ; les relations organiques entre les différents « plants » commencent à disparaître par la mort des plus vieilles tiges et de leurs racines adventives. Les « plants » peuvent donc devenir autonomes au cours de leur progression distale lorsqu'ils ont constitué leur propre système racinaire. Certains peuvent alors disparaître, d'autres se développer. A ce stade, on distingue un ensemble de nouvelles touffes en forme de croissant, de bâton, de cercle, situées grossièrement la même distance d'un point central, emplacement de la touffe-mère. L'espace central est alors occupé par d'autres espèces. Pour ce qui est de la Nardaie à 1 350 mètres d'altitude précédemment citée, l'étude de la présence simultanée des espèces sur 400 points quadrats permet de préciser lesquelles : la présence de Nard est associée moins souvent que le hasard ne le voudrait à celle de *Festuca duriuscula*, *Festuca rubra* L. et *Deschampsia flexuosa* (L.), et plus souvent aux mousses et à *Luzula campes-*

tris L., qui sont donc les espèces susceptibles de coloniser préférentiellement les emplacements d'anciennes touffes.

Sénescence.

Persikova (1959) décrit différentes étapes morphologiques dans l'évolution de la touffe depuis la germination de la graine. Elle décrit à partir de 6-8 ans une période « adulte » et une période sénescente au-delà de 25-30 ans. Mais, à notre avis, si les conditions écologiques restent propices, le rajeunissement des vieilles touffes par éclatement peut perpétuer le peuplement indéfiniment. Aussi la notion de touffe sénescente ne nous semble pas être une question d'âge : de nombreuses nardaies de plus de 30 ans restent très agressives. Le degré de jeunesse des peuplements nous semble beaucoup plus lié à une action du mode d'exploitation sur le comportement des touffes et beaucoup moins aux propriétés biologiques de la plante en soi.

3. — *Morphologie et disposition des talles*

Description des talles.

Les talles émettent des feuilles dont la morphologie varie selon leur numéro d'ordre (fig. 1).

Les premières feuilles émises, une ou deux, sont en réalité des écailles : petites, pratiquement dépourvues de chlorophylle, elles deviennent très vite membraneuses, brunâtres et meurent. Leur limbe est inexistant ou symbolisé par un crochet. La talle émet ensuite ou non une feuille à limbe très réduit (2-5 millimètres) dont la gaine est de taille normale.

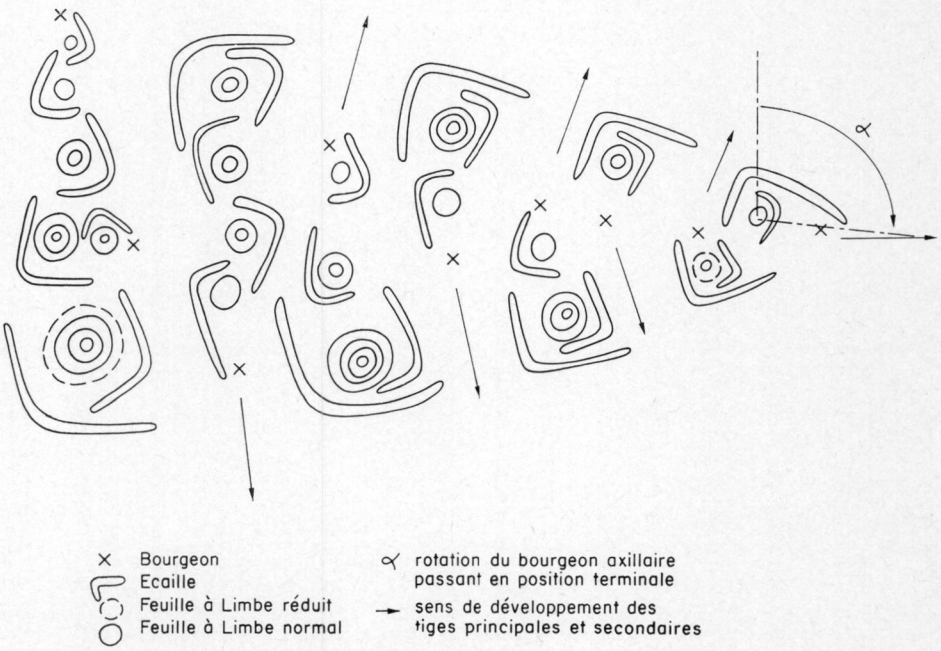


FIG. 2. — *Diagramme d'un rhizome de Nard.*

Ce n'est qu'en 3e ou 4e ordre que les feuilles complètes apparaissent. Comme chez la plupart des graminées, la croissance se fait à partir de la zone située à la jonction de la gaine et du limbe et enfermée dans les gaines des feuilles précédentes. Lorsque l'articulation limbe-gaine sort, la croissance est terminée ; le limbe qui était jusqu'alors vertical se coude au niveau de la gaine selon un angle qui augmente avec l'âge de la feuille. Les feuilles vieillies commencent à se dessécher par la pointe. La touffe en place se présente donc comme hérissée de feuilles soit verticales et entièrement vertes, soit inclinées par rapport à la verticale et jaunissantes, soit couchées sur la surface du sol et mortes.

Les feuilles complètes qui apparaissent dans les gaines des précédentes sont au nombre de 5 à 7, mais peuvent se limiter à 3 ou 4 en cas de talles florifères.

Disposition des talles sur le rhizome.

A la dissection, on distingue 2 rangs parallèles de talles situées à l'aisselle de 2 séries d'écailles disposées en quinconce (fig. 2). La dernière écaille abrite la plus jeune talle et le bourgeon situé en position terminale. Une coupe transversale fait apparaître la nature axillaire du bourgeon (fig. 3). En accord avec Persikova, celui-ci se déplace par la suite dans une rotation vers l'avant. Il se met ainsi dans l'alignement des talles les plus vieilles et assure la progression d'un rhizome sympodique formé par la succession des premiers entre-nœuds des talles axillaires successifs. Particularité anatomique, le bourgeon axillaire ne se développe pas à l'aisselle même de la 1re écaille ; il est incorporé plus haut sur la tige avant le niveau d'insertion de la 2e écaille (fig. 3*a*).

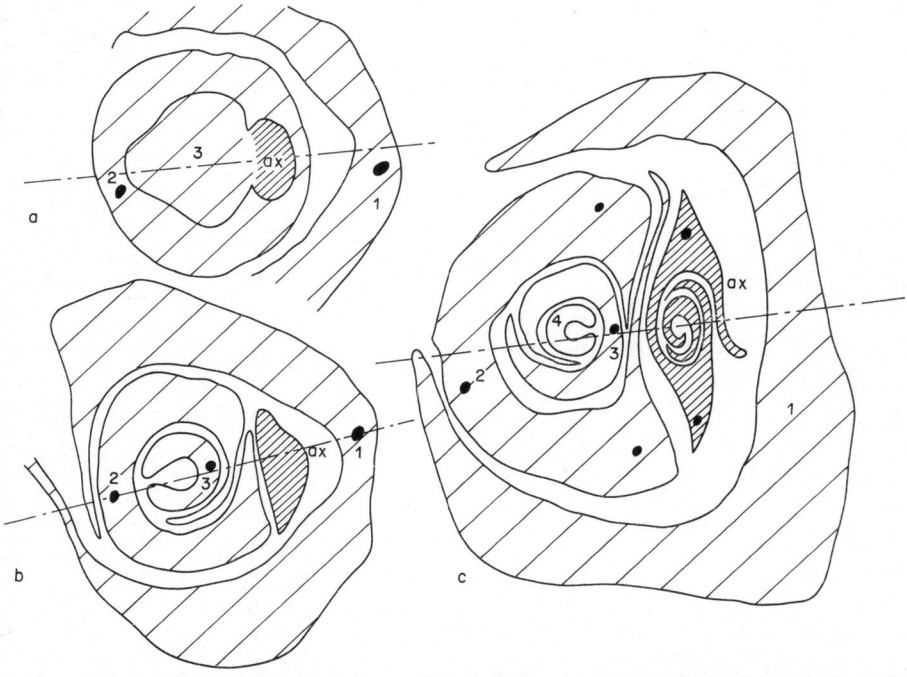


FIG. 3. — *Coupe transversale d'un bourgeon axillaire à différents stades de développement* (J. E. Loiseau comm. pers.). Le bourgeon (ax) est axillé par la première feuille (1) et s'insère très haut au-dessus (a).

Cette organisation est toute différente de l'organisation monopodiale habituellement rencontrée chez les graminées fourragères. Elle est peut-être à l'origine d'autres différences de comportement que nous allons rencontrer, particulièrement à la floraison.

La 2e écaille émet à son tour un bourgeon axillaire. Celui-ci ne se développe réellement que lorsque la talle qui le porte se trouve en 2e ou 3e position sur le rhizome. Dans une touffe en fin de période de tallage, les premières talles possédant une racine adventive se trouvent en 5e, 6e ou 7e position. Les 5-7 premières talles sont donc totalement dépendantes du rhizome ancien pour l'alimentation minérale et hydrique. A partir de ce rang, le bourgeon axillaire de la 2e écaille commence à développer un rhizome secondaire de 3-4 talles qui sort des vieilles écailles et crée une ramification sur le rhizome principal.

Ainsi s'explique la formation d'un « plant » qui présente déjà la zonation caractéristique de la touffe avec les bourgeons en couronne extérieure et les talles les plus anciennes au centre (fig. 2).

II. — Vitesse de croissance des organes au sein de la touffe

La touffe possède plusieurs centaines de talles disposées selon le schéma décrit dans la 1re partie. Cette structure n'est pas compatible avec n'importe quelle vitesse d'apparition des talles et des feuilles, et il est intéressant de connaître à quelles constantes elle correspond dans la dynamique de la croissance végétative.

Un travail a été réalisé en chambres climatisées après une 1re étude au champ qui avait suscité de grandes difficultés pour suivre sur le terrain des organes végétatifs individuellement repérés au sein de la touffe.

1. — *Matériel et méthodes*

La méthode consiste à suivre de façon continue l'apparition et la croissance des talles et des feuilles dans les touffes. Des éclats de touffes de Nard de 4 à 6 talles et contenant un bourgeon axillaire développé ont été repiqués dans des pots remplis de la terre d'origine des touffes. Chaque talle est marquée à l'aide d'un fil portant une étiquette. Huit opérations ont été réalisées au long de 133 jours de croissance entre le 9 janvier et le 22 mai où l'on mesurait la longueur de chaque feuille repérée par son numéro d'ordre sur la talle. A chaque fois, les nouvelles feuilles ou talles apparues étaient mesurées ou notées. Nous dirons qu'une feuille « apparaît » lorsque son limbe commence à se dégager des gaines précédentes ; dans toute la suite, nous discuterons sur les vitesses apparentes de production des feuilles et non pas sur les vitesses d'apparition réelles au niveau des méristèmes. De même, les jeunes talles ne sont comptées qu'à partir du moment où elles atteignent 1 centimètre. Les pots sont placés dans différentes enceintes :

— 5 pots dans une chambre de culture à 25 °C le jour et 15 °C la nuit, en jours de 12 heures.

— 12 pots dans une chambre de culture à 20 °C le jour et la nuit, en jours de 12 heures.

— 6 pots sous serre.

En référence, à 1 350 mètres d'altitude, une très belle journée du mois d'août donne des températures minimales de 10-12 °C et maximales de 20-25 °C.

Critères de croissance.

Les touffes repiquées ne sont pas absolument identiques : l'âge, le nombre de feuilles des différentes talles et le nombre de talles varient d'une touffe à l'autre. Il est donc nécessaire de chercher des critères pour comparer la croissance de chaque touffe.

Les auteurs anglais utilisent la notion de vitesse relative de croissance (Relative Growth Rate ou RGR). Sa justification provient de la forme exponentielle des courbes de croissance qui entraîne la constante des termes de la forme dM/Mdt. On peut de cette façon définir plusieurs vitesses relatives de croissance en considérant que le matériel présent au départ (M) produit pendant un temps dt un certain poids, une certaine longueur de feuilles, un certain nombre de feuilles ou de talles (dM) :

— RGR NT/NT en p. 100/jour = dNT/NT dt (NT nombre de talles)
— RGR NF/NF en p. 100/jour = dNF/NF dt (NF nombre de feuilles)
— RGR LF/LF en p. 100/jour = dLF/LF dt (LF longueur de feuilles)

Nous utilisons les croissances brutes, c'est-à-dire les croissances calculées en mesurant à chaque instant l'ensemble des organes morts ou vivants. En pots, il n'y a pas de disparition d'organes morts et cette croissance est toujours positive, alors que la croissance nette, mesurée en comptant uniquement les organes vivants, peut prendre des valeurs négatives.

2. — *Résultats*

a) *Vitesse de croissance à régime climatique constant.*

En régime climatique constant, les vitesses relatives de croissance pour les périodes consécutives d'une vingtaine de jours sont constantes : au cours des 150 jours de croissance, on ne peut pas mettre en évidence de variations dans le temps, sauf pour la vitesse d'apparition des talles dans le cas des régimes de température contrastés.

Les vitesses relatives de croissance sont données dans le tableau 2. Le régime de températures contrastées augmente la vitesse de croissance des limbes et diminue celle de l'apparition des feuilles et des talles par rapport au régime de température constante. Ceci suggère un effet des rythmes thermiques sur la répartition des produits de la photosynthèse : les hydrates de carbone s'orientent plus vers les parties basses aux températures 20/20 °C et plus vers les parties hautes aux températures de 25/15 °C. Le régime thermique peut aussi agir directement sur la morphogénèse en favorisant tantôt l'accroissement cellulaire (croissance des organes déjà formés) à 25/15 °C, tantôt la division cellulaire (formation des organes au niveau des méristèmes) à 20/20 °C.

Par ailleurs, la taille des limbes obtenus à 25/15 °C est plus grande que celle des limbes obtenus à 20/20 °C. La date d'apparition n'a pas d'influence, mais la taille des limbes augmente avec le numéro d'ordre de la feuille. L'influence du régime de température est donnée par les régressions suivantes :

à 20/20 °C : $L = 4{,}6 + 1{,}1$ NO ($r = 96$) (L : Longueur du limbe)
à 25/15 °C : $L = 4{,}3 + 2{,}3$ NO ($r = 99$) (NO : Numéro d'ordre de la feuille).

TABLEAU 2

Vitesses de croissance de la touffe de Nard à différentes températures

Régime de températures	25/15 °C	20/20 °C
— *Production de limbes*		
Longueur de limbe par talle en fin d'expérience	20 cm	14 cm
Production de limbe par touffe en 100 jours	158 cm	139 cm
Vitesse relative de production de limbes	1,9 p. 100/j	1,6 p. 100/j **
— *Production de feuilles*		
Production de feuilles par touffe en 100 jours	19,0 f	22,2 f
Vitesse relative de production de feuilles	1,5 p. 100/j	1,8 p. 100/j *
— *Production de talles*		
Production de talles par touffe en 100 jours	6,1 t	9,4 t
Vitesse relative de production de talles	1,0 p. 100/j	1,4 p. 100/j
— *Rapport limbes/limbes + gaines en fin d'expérience*	44 p. 100	36 p. 100
— *Rapport limbes/plante entière en fin d'expérience (en M. S.)*	23 p. 100	15 p. 100

* Significatif au niveau 10 p. 100.
** Significatif au niveau 5 p. 100.

Ceci correspond à une différence de 5 centimètres pour les feuilles complètes d'ordre 5 au profit des feuilles qui ont poussé à 25/15 °C.

b) *Vitesse de croissance sous serre.*

Sous serre, on remarque un accroissement des vitesses de croissance au cours du temps (fig. 4). Au début de la période de croissance, les vitesses d'apparition des feuilles ou des talles sont plus élevées que la vitesse d'élongation des limbes ; puis cette tendance s'inverse après le 70e jour. D'une façon générale, lorsque les jours sont courts et les températures basses, la croissance affecte principalement les parties basses de la touffe où se créent les organes.

Lorsque les jours allongent et que les températures augmentent, la croissance affecte les organes déjà créés, essentiellement la longueur des limbes.

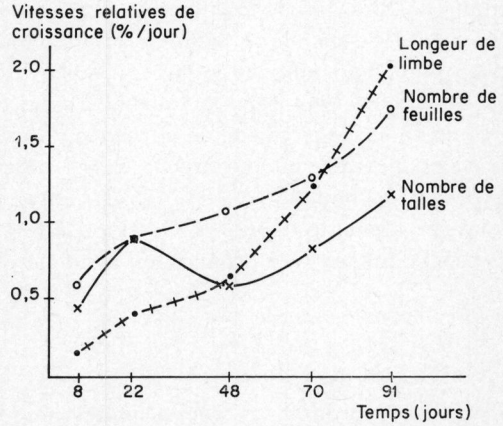


FIG. 4. — *Evolution des vitesses de croissance sous serre.*

c) *Production brute et production nette.*

La répartition de la production brute entre organes morts et organes vivants est fonction du régime de température (tab. 3).

TABLEAU 3

Production d'organes vivants et morts par des touffes de Nard dans 2 conditions climatiques

	Etat au 9 janvier		Etat au 20 mai		
	Vivant	Mort	Vivant	Mort	
Chambre à 25/15 °C			(1)	(2)	(2)/(1)
Nombre de talles	20	0	53	8	15
Nombre de feuilles	23	5	131	25	19
cm de limbe	72	69	1 042	161	15
Chambre à 20/20 °C					
Nombre de talles	46	0	154	25	16
Nombre de feuilles	50	11	327	71	22
cm de limbe	231	222	1 811	615	34

On ne peut pas affirmer que l'abaissement de la vitesse d'apparition des feuilles ou des talles corresponde aussi à une augmentation de la mortalité de ces organes. En revanche, quand la vitesse de production de limbes diminue, la mortalité augmente. Une interprétation serait la suivante : à température variable, les produits de la photosynthèse restent dans la feuille, d'où un fort accroissement des limbes et une faible mortalité ; à température constante, ils migrent ou sont perdus par respiration nocturne d'où un faible accroissement et une forte mortalité.

Exprimée en matière sèche, la perte sur pied lors du dessèchement des limbes est de 23 p. 100. Tout ou partie de cette perte peut être recyclé par la migration de certaines réserves dans les parties vivantes. En effet, lors du dessèchement des feuilles sur la Nardaie, les teneurs en N, P, K et Mg de la matière sèche baissent non pas de 23 p. 100 mais respectivement de 40, 50, 90 et 40 p. 100 environ.

Lors de la période de croissance active que nous avons observée, un tel recyclage contribuerait au maximum à 10 p. 100 de la vitesse de croissance. Mais dans la touffe en période de dessèchement telle qu'elle se présente à l'automne, ce phénomène est probablement beaucoup plus important car toutes les feuilles développées se dessèchent. Une accumulation de réserves dans les parties basses, particulièrement les bourgeons, expliquerait le démarrage rapide de la croissance au printemps. Le Nard n'étant jamais coupé, il est possible qu'une fauche à une date judicieuse perturbe considérablement le processus habituel et, peut-être, indispensable de migration (voir 3e partie). Chez les graminées fourragères, Gillet a constaté des pousses de printemps d'autant plus précoces que le repos préhivernal avait été plus long.

d) *Conclusion.*

Plasticité des touffes.

Le régime de température produit un certain modelage de la touffe (tabl. 2) : les températures alternées produisent des touffes moins fortes du pied, à feuilles peu

nombreuses mais de grande taille ; les températures constantes donnent au contraire des touffes plus basses, très riches en feuilles et bien implantées dans leurs parties souterraines.

La souche du Nard étant particulièrement puissante, la possibilité d'obtenir un étiolement est intéressante en agronomie. Les moyens agronomiques de favoriser les organes aériens par rapport aux organes souterrains sont connus : faible éclairement (provoqué par exemple par l'absence d'exploitation), bon approvisionnement en eau, en minéraux. Par la suite, le contrôle des parties aériennes peut être obtenu facilement par la fauche.

Rôle du climat.

A l'aide des résultats obtenus sur les rythmes de croissance, on peut tenter de caractériser la dynamique de la touffe dans le climat réel : le printemps doit aboutir assez vite à une croissance accélérée des limbes qui peut se poursuivre au début de l'été pendant les jours longs. En fin d'été et en début d'automne, les écarts de température sont moins élevés entre le jour et la nuit (respectivement 8,5 en juin et 6,7 °C en septembre) ; la croissance se porte sur les parties basses (création de feuilles et de talles) tandis que la mortalité des limbes augmente. Cette 1re approche permet de localiser dans la 2e moitié de la saison de croissance les phénomènes qui déterminent la perennité de la touffe.

Ces conclusions restent peu opérationnelles tant que l'on n'a pas vérifié, dans les conditions de climat et de compétition qui existent sur le terrain, l'existence de phases d'étiolement de la touffe ou inversement de renforcement des organes situés au niveau du sol. De plus, il faut tenir compte des phénomènes de développement-floraison.

III. — Evolution saisonnière des touffes sur le terrain dans différentes conditions agronomiques

Une étude a été entreprise pour préciser *in situ* la biologie du Nard au cours de la période de croissance annuelle à 1 350 mètres d'altitude. La formation végétale a la physionomie typique des Nardaies ; le volume spécifique (méthode de « rank » d'après Poissonet P. et Poissonet J., 1969) du Nard est de 30 à 40 p. 100.

Au plan phytosociologique, elle est semblable à celle décrite par Quezel et Rioux (1954) dans le Cantal à 1 450 mètres d'altitude. Selon ces auteurs, il s'agit d'une formation issue d'un horizon sylvatique par l'intermédiaire de la lande à Airelles et Gentiane jaune. La position intermédiaire de cette Nardaie entre la Nardaie des combes à neige et la Nardaie anthropique apparaît bien par comparaison aux relevés de Cusset et Lachapelle (1961) dans les Monts Dore.

Selon Delpech (comm. pers.), il ressort de l'analyse phytosociologique que la Nardaie étudiée se rattache nettement à l'alliance *montagnarde* de *Nardo-Galion-saxatile*, ce qui est d'ailleurs en concordance avec l'altitude de la station, mais que la présence de 4 espèces caractéristiques de l'alliance du *Nardion* dénote déjà un passage vers la Nardaie subalpine, laquelle n'existe cependant, sous sa forme authentique, qu'à des altitudes nettement plus élevées :

— Quatre espèces seulement sont caractéristiques de l'alliance du *Nardion* (qui comporte en tout 16 espèces caractéristiques) ou de la classe des *Caricetea curvulae* Br.

Bl. (comportant 20 espèces caractéristiques) à laquelle se rattache cette alliance : *Potentilla aurea* L., *Leontodon pyrenaicus* Gouan, *Trifolium alpinum* L., *Selinum pyrenaeum* (L.).

— Sept espèces sont caractéristiques, soit de l'alliance du *Nardo-Galion saxatilis* Prsg : *Galium hercynicum* Weigel, *Meum athamanticum* Jacq., soit de la classe des *Nardo-Callunetea* Prsg., à laquelle se rattache cette alliance : *Danthonia decumbens* (L.), *Genista pilosa* (L.), *Potentilla Tormentilla* (L.), *Calluna vulgaris* (L.), *Luzula campestris* L. (sur un ensemble de 25 espèces caractéristiques).

— Trois espèces se rencontrent indifféremment dans l'un ou l'autre des groupements précédents : *Nardus stricta* L., *Arnica montana* L., *Gentiana lutea* L.

— Cinq espèces sont des caractéristiques de la classe des *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. ou d'un groupement subordonné à cette classe : *Molinia coerulea* L., *Festuca rubra* L., *Achillea millefolium* L., *Polygonum bistorta* L. et *Serratula Tinctoria* L.

Les autres espèces sont des compagnes, acidiphiles pour la plupart.

La dynamique du Nard est étudiée par une série d'observations sur plusieurs touffes à différentes dates de la saison de croissance active :

1. une description de l'aspect global des touffes, pour préciser la physionomie du peuplement et son appétabilité pour le bétail.
2. une dissection des touffes en leurs différentes catégories de talles pour préciser les conditions de renouvellement, de croissance, de floraison et de dessèchement des talles.

En vue de raisonner les techniques d'éradication, différents traitements agronomiques sont imposés à la Nardaie :

1. forte charge en brebis (10 brebis/hectare), avec 40 unités de P_2O_5 et de K_2O/hectare ..... B
2. faible charge en brebis (5 brebis/hectare), avec 40 unités de P_2O_5 et de K_2O/hectare ..... b
3. charge nulle sans fertilisation
   - — sans fauche (mise en défens)..... MD
   - — avec fauche en début de saison ..... F 1
   - — avec fauche en milieu de saison..... F 2
   - — avec fauche en fin de saison ..... F 3

Les traitements 1 et 2 ont débuté en 1972. Les traitements 3 ont été mis en place en 1973 sur une Nardaie soumise auparavant à une pâture légère sans fertilisation. Les fauches F 1, F 2 et F 3 ont eu lieu en 1973 et 1974. Elles sont effectuées à la motofaucheuse (2 passages en sens inverse). La hauteur de coupe par rapport à la touffe correspond à l'ablation de tous les limbes.

En 1974, 5 touffes ont été prélevées sur chacun des traitements les 28/5, 11/6, 30/7, 27/8 et 23/9.

1. — *Etude du peuplement de touffes*

a) *Influence du traitement agronomique sur la densité et la taille des touffes.*

En régime de pâture, quelle que soit la charge, le nombre de touffes par unité de surface n'a pas évolué pendant 2 ans de traitement. Un phénomène particulier à

la charge la plus élevée est une forte individualisation des touffes, qui sont de plus en plus circonscrites par la pâture. L'absence de pâture provoque une certaine diminution du peuplement, probablement par un phénomène de compétition pour la lumière.

La fauche stimule la multiplication des touffes quelle que soit sa date (fig. 5). La fauche précoce provoque une augmentation modérée du nombre de touffes ; en effet, cette fauche intervient au moment de la croissance de jeunes talles déjà en place et cette période n'est pas propice au tallage. La fauche de mi-saison, qui se situe au tout début de la reprise du tallage, provoque une augmentation considérable du nombre de touffes ; la fauche de fin de saison, qui se situe à la fin du tallage d'automne, produit une augmentation modérée.

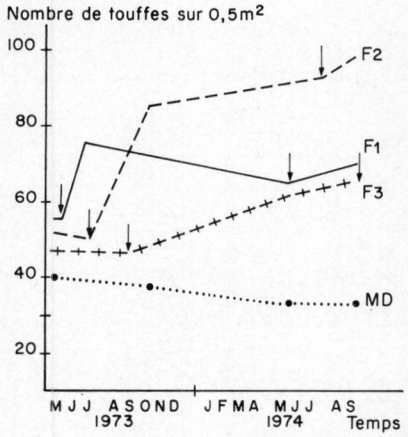


FIG. 5. — *Evolution du peuplement de touffes.*
MD = 0 brebis/ha. F1 = fauche fin mai. F2 = fauche fin juillet. F3 = fauche en octobre.

Les dimensions des touffes sont données dans la figure 6. Elles restent à peu près identiques à celles de la faible charge dans le cas de la fauche précoce ; elles diminuent sous l'action de fauches plus tardives. En moyenne sur l'année, l'occupation du terrain par les touffes régresse fortement sur la fauche de fin de saison (légère augmentation du nombre mais forte diminution de taille), modérément sur la fauche de mi-saison (forte augmentation du nombre avec diminution de taille) elle augmente dans le cas de la fauche précoce (augmentation du nombre sans diminution notable de la taille).

b) *Aspect saisonnier des touffes.*

Au printemps, la touffe est hérissée de feuilles sèches. Les talles formées à l'automne croissent à travers cette masse sèche, puis la dépassent fin juin et début juillet. Après la floraison, les feuilles se dessèchent progressivement par le haut : la touffe paraît verte à l'intérieur alors que les limbes les plus hauts sont jaunis. D'après la physionomie des touffes, la période de pâture la plus favorable semble bien être la période qui suit le début de la croissance, soit celle du 10 juin au 10 juillet. Par la suite, la floraison devient un facteur de refus.

Le niveau de chargement agit peu sur l'aspect de la touffe, de même que la fauche du début de saison. Les fauches réalisées après la mi-juillet prolongent la « période verte » plus loin dans l'arrière saison. Du strict point de vue physionomique, c'est la fauche de fin de saison qui paraît la plus favorable à une amélioration prolongée de l'appétibilité (fig. 6). D'une façon générale, chez les graminées pérennes, les coupes tardives laissent toujours un végétal ayant moins de déchet l'année suivante (Gillet).

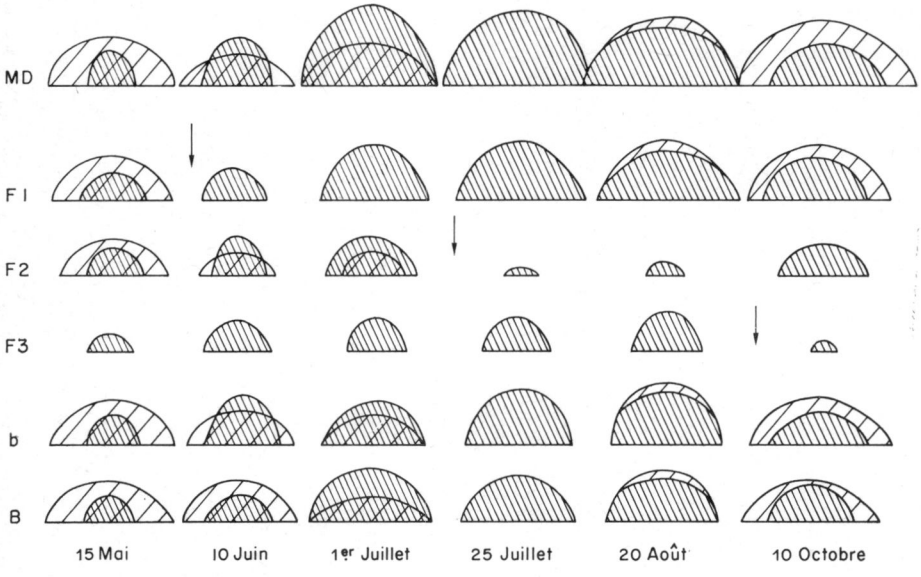


FIG. 6. — *Aspect de la touffe de Nard et évolution au cours du cycle annuel de croissance.*

Organes désséchés.
Organes verts.
Fauche.

2. — *Etude des talles*

a) *Le phénomène de dessèchement des feuilles.*

Une talle est qualifiée de verte tant qu'elle ne présente pas plus de 1 centimètre de limbe desséché. Pris dans cette acception, le dessèchement est d'abord un phénomène lié à l'âge des talles : il est rare qu'une talle de plus de 3 feuilles soit verte et qu'une talle de 1 feuille soit sèche.

Conformément à l'aspect général de la touffe, la proportion de talles entièrement vertes augmente jusqu'à la floraison et décroît pendant l'arrière-saison. L'état de dessèchement le plus avancé est constaté à la fonte des neiges.

La charge augmente le pourcentage de talles entièrement vertes ; elle ralentit le phénomène de dessèchement automnal. Les fauches de début et surtout de fin de saison maintiennent le dessèchement à un niveau faible, et pour cette raison sont susceptibles d'augmenter l'appétibilité du Nard. La fauche de juillet retarde le dessèchement

d'automne mais n'a pas d'action sur la verdeur des talles du démarrage de la végétation à la floraison (fig. 7).

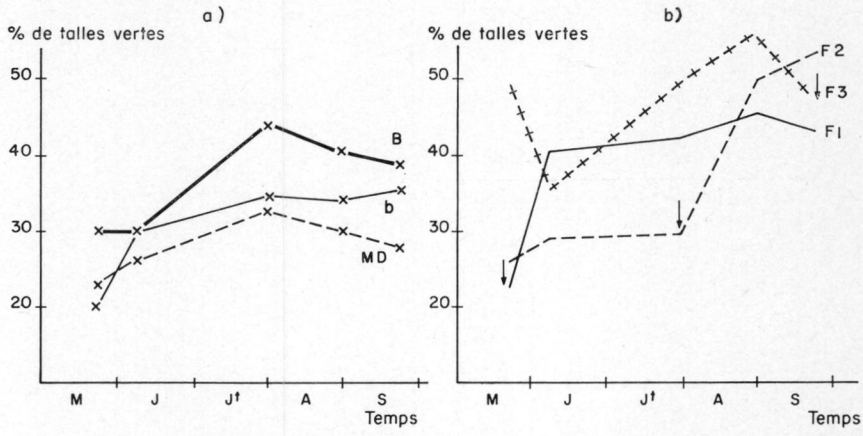


FIG. 7. — *Evolution de la proportion de talles vertes au cours du cycle de la touffe.*

a) influence de la charge.
b) influence de la fauche.

b) *La floraison.*

En 1974, l'épiaison a été précoce : elle a commencé fin mai et il existait encore des talles au stade gonflement au 30 juillet. Sur un endroit mis en défens depuis 3 ans, des coupes sévères ont été effectuées toutes les semaines. L'absence de floraison après coupe laisse à penser que tous les apex florifères étaient montés avant le 10 juin 1974 (avant le 16 juin pour 1975).

Intensité de floraison.

Nous appelons intensité de floraison le pourcentage de talles égalant ou dépassant le stade gonflement des gaines par rapport au nombre total de talles.

Des observations instantanées ont été effectuées les 28 mai, 11 juin et 30 juillet par méthodes destructrices : l'intensité de floraison augmente du 28/5 au 11/6 et au 30/7. Il est possible de faire une estimation de l'intensité de floraison absolue sur la période de la floraison en sommant les intensités de floraison instantanées au 11/6 et au 30/7. Les hypothèses sont les suivantes :

— faible variation du nombre de talles pendant cette période ;
— les talles notées fleuries au 28/5 sont de nouveau comptabilisées le 11/6 ;
— les talles fleuries le 11/6 meurent et disparaissent avant le 30/7 ;

Sous ces hypothèses, le tableau 4 montre que l'augmentation du chargement en brebis intensifie la floraison. Les traitements par la fauche ont une action variable. Une fauche de fin de saison déprime énormément la floraison, en accord avec Gulding (in Chadwick) : la fauche supprime les parties aériennes des talles susceptibles de fleurir l'année suivante. Une fauche de début de saison a pour effet de léser ou de supprimer une grosse partie des apex et d'empêcher la floraison, mais la repousse

après une telle fauche permet la préparation de nombreuses talles à fleurs pour l'année suivante. Une fauche de milieu de saison, peu après le maximum d'intensité de la floraison, crée des conditions optima pour la floraison de l'année qui suit.

TABLEAU 4

Taux de floraison par classes de talles et intensité de floraison de la touffe

Traitement agronomique Taux de floraison des talles (en p. 100)	Talles de	F2	B	b	MD	F3
au 28/5	2 f	2	4		0	0
	3 f	27	31	5	1	1
	4 f	23	26	11	6	2
	5 f	23	24	13	8	0
	6 f	12	13	2	0	0
au 11/6	2 f	21	4	1	0	0
	3 f	52	46	31	7	2
	4 f	53	46	33	3	7
	5 f	39	40	45	2	5
	6 f	17	6	18	0	0
au 30/7	2 f	8	3		0	0
	3 f	19	19	6	1	0
	4 f	26	23	15	1	0
	5 f	14	27	12	1	0
	6 f	12	5	4	0	0
Intensité de floraison de la touffe		39	32	22	3	2

F2 : fauche en juillet — B : forte charge en brebis — b : faible charge — MD : mise en défens — F3 : fauche en septembre.
Pour la définition des termes, se reporter au texte.

Rôle des différentes classes de talles dans la floraison.

Un nombre minimum de feuilles est nécessaire à une talle pour fleurir, mais le taux de floraison n'est pas une fonction croissante du nombre de feuilles comme chez d'autres graminées (Wilson, 1959).

On a mesuré le taux de floraison de chaque classe de talles, c'est-à-dire à un instant donné le pourcentage de talles au moins au stade gonflement. Le taux de floraison maximum est observé pour les talles de 3, 4 ou 5 feuilles selon la date et le traitement agronomique imposé. Les talles de 2 et 6 feuilles ont des taux de floraison faibles (tabl. 4).

En faisant les mêmes hypothèses que ci-dessus, le taux de floraison absolu d'une catégorie de talles est la somme des taux de floraison instantanés du 11/6 et du 30/7. La figure 8 montre, comme on pouvait s'y attendre, une croissance linéaire du taux de floraison des talles de 3 et 4 feuilles avec l'intensité de floraison de la touffe. Les talles de 2 feuilles sont totalement inhibées en dessous d'un taux de floraison de 20 p. 100 ; celles de 5 feuilles sont partiellement inhibées au-dessus d'un taux de floraison de 30 p. 100. Ainsi, plus la floraison est intense, plus la contribution des jeunes talles à la floraison est grande.

La corrélation positive entre talles adultes et talles jeunes est connue chez les graminées. Gillet a fourni l'hypothèse de substrats ou hormones agissant avant ou pendant l'induction primaire. Au contraire, l'existence d'une corrélation négative avec les vieilles talles est inhabituelle. Il est possible que ces vieilles talles, âgées d'un an environ, aient été inhibées à l'état jeune lors de la floraison de l'année précédente.

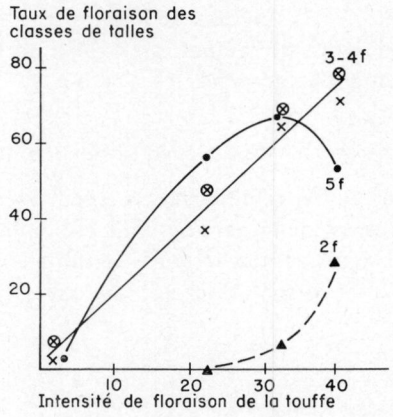


FIG. 8. — *Taux de floraison des différentes catégories de talles selon l'intensité de la floraison.*

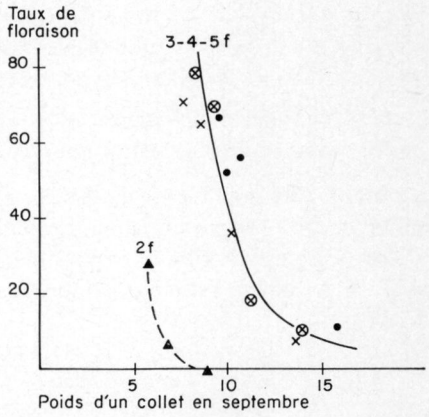


FIG. 9. — *Relation entre le taux de floraison des talles et le poids d'un collet en septembre* (exprimé en mg de M.S.).

▲ talles de 2 feuilles.
× talles de 3 feuilles.
⊗ talles de 4 feuilles.
● talles de 5 feuilles.

Croissance des talles et floraison.

Il existe une antinomie entre le pouvoir de floraison de la touffe et ce que l'on pourrait appeler sa « vigueur ». D'une part, le poids individuel des talles (et surtout le poids des parties basses de ces talles) en septembre est en liaison négative avec leur taux de floraison au printemps suivant (fig. 9). Par conséquent, la floraison ne serait pas forcément liée positivement à une bonne fourniture en matériaux métabolisés, comme le pense Perkins (1968). Blondon (1964) cite même des cas où une croissance restreinte est liée à une floraison accrue. D'autre part, ce sont toujours les touffes dont les talles sont en moyenne plus âgées (voir § suivant : âge physiologique) qui fleurissent de façon plus fournie. En cela, une forte croissance végétative s'oppose à la floraison. Blondon (1965) cite d'autres cas où les bourgeons végétatifs inhibent le développement des vieilles talles.

Une forte dominance des apex végétatifs est d'ailleurs absolument indispensable chez le Nard : la partie jeune qui est totalement dépendante du reste de la plante (peu de limbes, pas de racines) doit obligatoirement contrôler les talles anciennes pour que les axillaires successifs puissent croître. On conçoit que la grande abondance de bourgeons que l'on trouve dans les touffes jeunes corresponde à un épuisement des hydrates de carbone nécessaires à la construction des tiges. Mais les mécanismes qui président à l'arbitrage entre la reproduction sexuée et la pérennité végétative sont inconnus.

Sur Fétuque élevée, Gillet pense soit à une inhibition de la mise à fleur, soit à un défaut d'induction primaire par prolongation de la phase juvénile et défaut de corrélation entre talles.

c) *Fréquence des différentes catégories de talles.*

Si l'on considère que l'apparition d'une feuille sur une talle est liée aux sommes de températures reçues par la talle (Ginsburger, 1974), on peut admettre que l'âge physiologique d'une talle est donné par son nombre de feuilles. Un indice de l'âge physiologique de la touffe est donné par la sommation des termes $Fi \times n_i$ où :

Fi est la fréquence de la catégorie de talles en p. 100,

n_i est le nombre de feuilles ; 0 pour un bourgeon, 1 pour les talles de 1 feuille,...

Le tableau 5 donne l'indice de vieillesse des touffes selon la saison et le traitement agronomique. On observe un rajeunissement de la touffe pendant l'été et l'automne. L'état de jeunesse est maximum avant l'hiver. Au printemps, la touffe vieillit brusquement et le vieillissement est maximum lorsque la floraison est la plus intense.

TABLEAU 5

Indice de vieillesse physiologique des touffes de Nard selon la date et le traitement agronomique

	F1	F2	F3	MD	b	B
28/5	332	278	209	211	259	252
11/6	—	268	209	237	272	243
30/7	225	249	234	216	242	214
27/8	235	238	192	215	217	227
23/9	205	212	185	172	183	188

— Fauche.

En effet, de mai à juin, on observe (cf. fig. 10) un maximum de talles de 4, 5 et 6 feuilles et un minimum de bourgeons. Au contraire, à partir du mois d'août, le pourcentage de vieilles talles diminue alors que la fréquence des bourgeons augmente. La période de végétation se divise donc en 2 parties : la crise du tallage et la reprise du tallage.

La crise du tallage.

La période de floraison est aussi une période d'acquisition de limbes : les talles, maintenues dans un état jeune à l'automne, croissent rapidement : en particulier, on observe en juin un pic d'abondance des talles de 1 feuille, qui se déplacera plus tard, au fur et à mesure de la croissance, vers les talles de 2 puis 3 feuilles.

Pendant la phase de floraison, on observe une chute de fréquence des bourgeons qui provient soit d'un certain déficit du tallage, soit d'une croissance très rapide des bourgeons, soit des deux. Ces signes d'une crise de tallage ne sont pas étonnants.

En 1973 comme en 1974, la crise du tallage semble se produire immédiatement dès le début de la période de végétation, sans passer par une période préliminaire de tallage printanier. Ceci est en relation avec la grande précocité de floraison du Nard.

La reprise du tallage.

A partir de mi-juillet en 1973, de la mi-juin approximativement en 1974, le tallage reprend et la fréquence des bourgeons augmente, alors que celle des talles de 4, 5 et 6 feuilles diminue. C'est une période de croissance où les jeunes talles naissent et croissent et où les vieilles talles meurent.

Dans ce phénomène général, on observe sur la figure 10 une période de dépression pour les talles de 1 feuille (1/8), de 2 feuilles (25/8), de 3 feuilles (25/9). Ceci correspond à l'acquisition de feuilles successives par la génération des talles à l'état de bourgeons à l'époque de la crise du tallage, et ne représente donc que le contre-coup d'un phénomène passé.

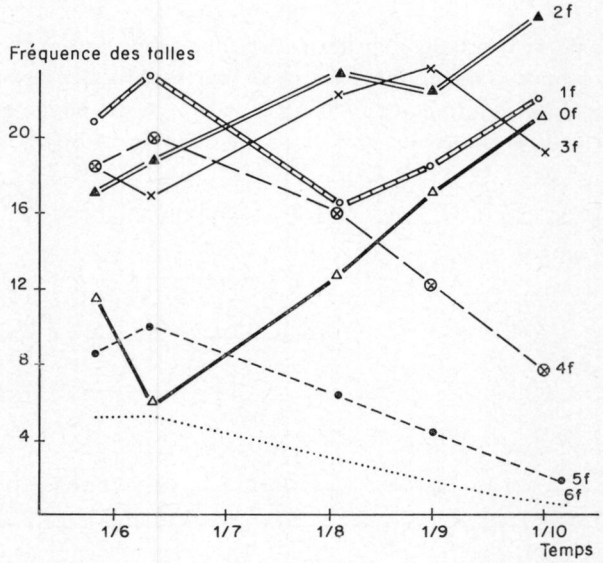


FIG. 10. — *Evolution de la fréquence des talles au cours du cycle de la touffe* (cas de la charge faible).

△ ▬ Talles de 0 feuille (bourgeons).
o ▭ Talles de 1 feuille.
▲ ═ Talles de 2 feuilles.
× —— Talles de 3 feuilles.
⊗ — — Talles de 4 feuilles.
● - - - - - Talles de 5 feuilles.
• ····· Talles de 6 feuilles.

Les talles du début de la crise du tallage acquièrent donc 2-3 feuilles avant l'hiver. Les talles qui naissent plus tard restent dans un état relativement jeune, car les sommes de températures qu'elles reçoivent deviennent de plus en plus faibles. Au contraire, l'apparition de bourgeons continue. Ceci explique l'état de jeunesse de la touffe en fin de période de croissance, déjà constaté par Perkins (1968).

Modèle pour la croissance des talles selon leur date d'apparition.

Les relevés météorologiques permettent de mesurer les sommes de températures nécessaires à l'acquisition de feuilles successives pour la génération de talles à l'état de bourgeons au 11/6 : les bourgeons reçoivent des sommes de température de 445 °C pour acquérir 1 feuille, 778 °C pour en acquérir 2 et 1 009 °C pour en acquérir 3. En se basant sur une croissance grossièrement logarithmique (1) des sommes de température nécessaires à la fabrication de x feuilles sur la même talle, nous admettrons :

sommes de températures nécessaires à l'acquisition d'une feuille supplémentaire :

talles de 0	feuille	450 °C
1	—	320 °C
2	—	230 °C
3	—	170 °C
4	—	130 °C
5	—	100 °C

De cette manière, il est possible de reconstituer l'évolution du peuplement de talles (fig. 11). Les bourgeons apparus avant la reprise du tallage sont sénescents au moment de l'hiver. Ceux qui sont nés au début de la reprise du tallage ont 2 ou 3 feuilles fin septembre. Ils assureront la plus grande partie de la floraison de l'année suivante.

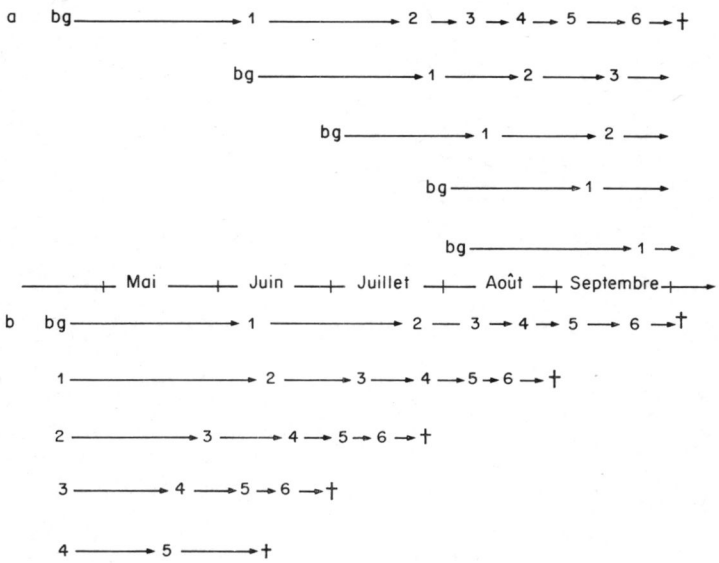


FIG. 11. — *Reconstitution de l'évolution du peuplement de talles.*

a) Evolution de bourgeons suivant leur date d'apparition.
b) Evolution des talles présentes en début d'année.
bg = bourgeon. 1 = talles de 1 feuille ...

(1) En régime climatique constant ($dt = k . \Theta$) ; on a vu que $\frac{dNF}{NF\,dt} = \text{constante}$, d'où $\frac{dNF}{NF} = k'd\,\Theta$, et $\Theta = a \log NF + b$.

Enfin les bourgeons de la reprise du tallage proprement dite sont figés par l'hiver au stade de 1 ou 2 feuilles. Ce sont donc les bourgeons issus après le 1er août qui assurent la pérennité de la touffe et la floraison. Toutes les talles présentes au début de l'année meurent avant l'hiver, même si elles ne fleurissent pas. Pour conclure, comme chez les autres graminées (Jewiss, 1972), le tallage d'été et d'automne est le phénomène clé dans la pérennité de la touffe ; en absence de tallage printanier, cette phase est encore plus critique chez le Nard.

Influence de la charge en brebis.

L'absence de pâture se traduit (cf. tabl. 5) par un rajeunissement général de la structure de la touffe. Le vieillissement habituel au moment de la floraison est peu marqué. En effet, on constate l'absence d'une crise du tallage qui est à mettre en relation avec une très faible intensité de floraison des touffes. Du point de vue de la structure de la touffe à l'automne, la pérennité est parfaitement assurée.

Avec une forte pâture, la crise du tallage est plus précoce qu'en faible charge. A l'époque de la floraison, la touffe a une structure plus jeune, ce qui semble gêner, par la suite, la reprise du tallage : l'augmentation de fréquence des bourgeons est moins rapide sur la forte que sur la faible charge.

En fin d'automne, le taux d'organes jeunes (bourgeons, talles de 1 et 2 feuilles) est de 64 p. 100 pour la forte charge contre 71 et 72 p. 100 pour la faible charge et la mise en défens.

Influence de la fauche.

Les fauches qui empêchent la floraison (fauches de fin ou de début de saison de croissance) suppriment aussi la crise du tallage. La fauche à la floraison est au contraire favorable à la floraison de l'année suivante et donc aussi à la crise du tallage. En ce qui concerne la reprise du tallage, les touffes coupées en début ou fin de saison ont un accroissement normal de leur fréquence de bourgeons à l'automne. Une fauche à la floraison freine au contraire le tallage.

La proportion d'organes jeunes fin septembre est de 59 p. 100 sur la fauche de juillet contre 61 et 67 p. 100 pour les fauches de mai et de septembre, alors qu'un développement normal atteint 71 p. 100.

Finalement, une fauche du Nard s'oppose d'autant plus à la pérennité de la touffe qu'elle est réalisée à une époque voisine de la pleine floraison.

d) *Poids des différentes catégories de talles.*

Dans tout ce paragraphe, il s'agit du poids en matière sèche des parties vivantes.

Evolution saisonnière.

Jusqu'à 3 feuilles, une talle est d'autant plus lourde qu'elle a plus de feuilles ; mais à partir du stade 3 feuilles, l'acquisition de feuilles supplémentaires ne se traduit plus par une augmentation du poids sec vivant ; la talle maintient son poids et fournit probablement le reste des photosynthétats pour la fabrication de racines ou de jeunes talles.

Toutes les classes de talles ont leur poids minimum en début d'année. Le maximum est d'autant plus tardif que la talle est jeune (juillet pour les talles de 5 feuilles ; septembre pour les bourgeons et les talles de 1 feuille). Tout se passe comme si les vieilles talles subissaient en fin de saison une perte de poids au profit des plus jeunes (fig. 12) et des racines (Perkins).

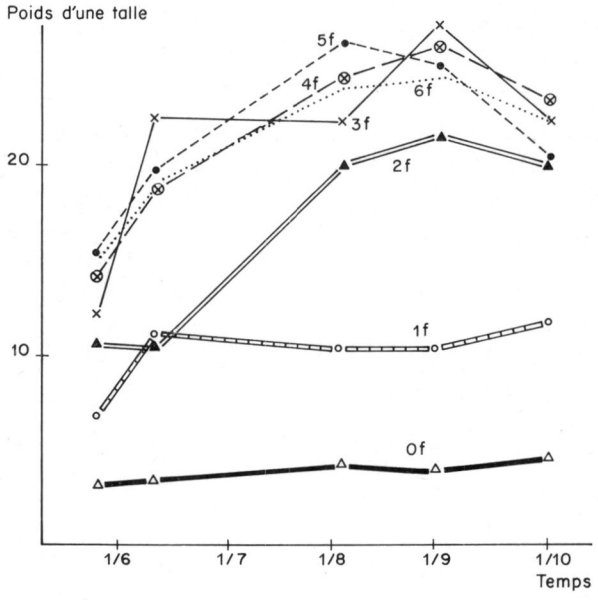


FIG. 12. — *Evolution du poids des talles* (mg de M.S.) *au cours du cycle de la touffe* (cas de la charge faible).

Influence de la charge.

Le poids des talles est d'autant plus élevé que la charge est faible (fig. 13). Du point de vue de l'évolution saisonnière, l'augmentation du poids des jeunes talles à l'automne est fortement freinée par la charge en brebis. La chute de poids des vieilles talles est d'autant plus tardive et atténuée que la charge est faible : sur la mise en défens, les vieilles talles ne perdent même plus de poids en fin de saison ; comme en même temps les limbes se dessèchent, ce phénomène met en évidence le stockage dans les collets.

Influence de la fauche.

Toutes les fauches abaissent le poids moyen des talles au-dessous du niveau de référence représenté par la charge faible (fig. 13). C'est la fauche de juillet qui est la plus efficace pour diminuer le poids des talles, particulièrement des jeunes à l'automne. Comme on l'a vu plus haut, la perte de poids des talles de 1 et 2 feuilles est en relation avec une intensité de floraison élevée des touffes au printemps suivant. Malgré tout, cette fauche freine mais n'empêche pas le grossissement des bourgeons à l'automne : la pérennité de la touffe est quand même assurée, au prix d'une compétition dommageable aux talles de 1 et 2 feuilles.

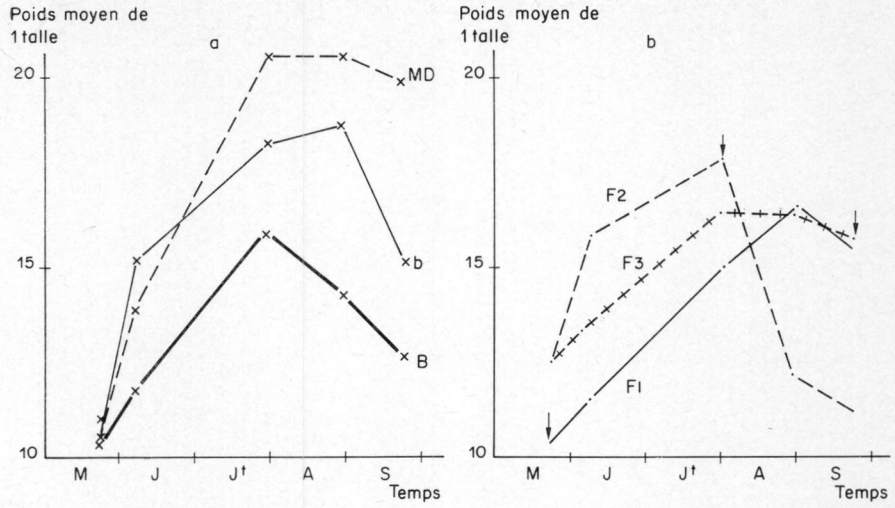


FIG. 13. — *Evolution du poids moyen d'une talle* (en mg de M.S.) *au cours du cycle de la touffe.*
a) influence de la charge en brebis.
b) influence de la fauche.

e) *Rapport de la masse des limbes à celle des gaines et des tiges (F/C).*

Le rapport F/C est un indice de l'activité photosynthétique par rapport aux activités de mise en réserve et de floraison.

Variations saisonnières pour les différentes catégories de talles.

Le rapport F/C moyen est fonction de la catégorie de talles : il est maximum pour les talles de 2 feuilles (130) et décroît par la suite avec le nombre de feuilles ; on obtient respectivement des rapports de 100, 90, 80 et 65 pour les talles de 3, 4, 5 et 6 feuilles, les talles de 1 feuille ayant un rapport moyen de 90. Le poids de limbes qui est l'image des possibilités photosynthétiques est maximum en août : les talles les plus « actives » sont alors les talles de 3 et 4 feuilles et, dans une moindre mesure, les talles de 2 et 5 feuilles.

Le comportement saisonnier fait apparaître 2 phases du développement : une phase de croissance du rapport F/C qui va du début de saison à la fin août, une phase de décroissance en septembre. Ces deux phases correspondent respectivement à l'acquisition de matériel photosynthétique d'été et à la mise en réserve d'automne.

On distingue par leur comportement saisonnier 2 types de talles ; les talles de 1 et 2 feuilles qui acquièrent très rapidement en début de saison un rapport F/C élevé et les talles de 3 feuilles et plus qui restent jusque vers la fin juillet avec un rapport bas (fig. 14). En début de saison, il semble que les très jeunes talles de 1 et 2 feuilles utilisent tous leurs photosynthétats et peut-être certaines réserves pour acquérir du matériel foliaire. Les talles de 3 feuilles et plus les utilisent plutôt pour produire les tiges florifères. Les vieilles talles qui existent après la floraison ont un rapport F/C beaucoup plus élevé qui s'explique par un poids de tiges plus faible.

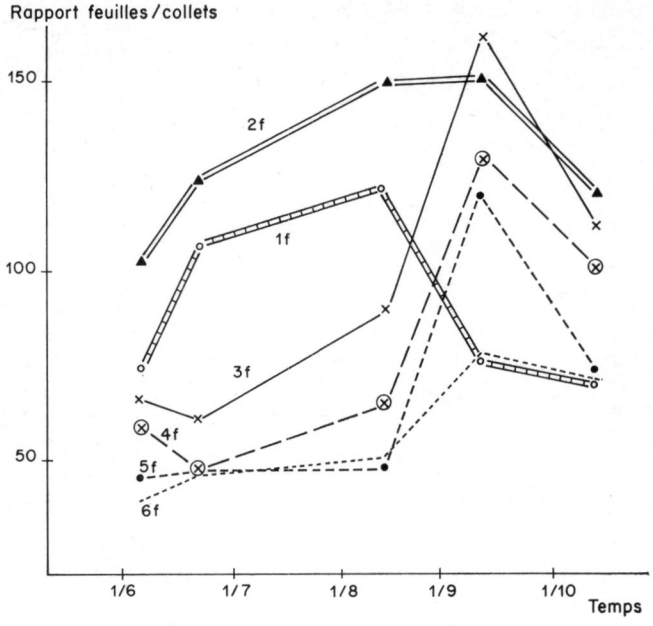


FIG. 14. — *Evolution du rapport* F/C *des talles au cours du cycle de la touffe.*
(cas de la forte charge).
F/C = poids des limbes vivants par rapport au poids des gaines et des tiges (en p. 100).

Influence de la charge.

Plus la charge est faible, plus le rapport F/C des jeunes talles s'accroît rapidement (fig. 15). Le rapport moyen de 100 est atteint en juillet dans la mise en défens et en août dans les stations pâturées, ce qui est en relation avec les taux de floraison croissants.

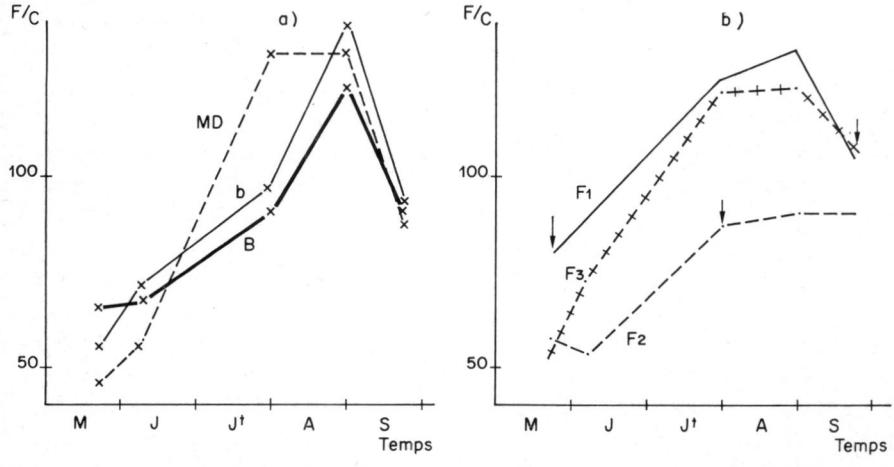


FIG. 15. — *Evolution du rapport* F/C *moyen au cours du développement de la touffe.*
a) influence de la charge en brebis.
b) influence de la fauche.

Influence de la fauche.

Les coupes de début et de fin de saison ont des effets semblables et peu marqués. Au contraire, une coupe à la floraison diminue fortement le rapport F/C sur l'ensemble de la saison de croissance (fig. 15). Cette diminution correspond, en début d'été, à une forte floraison et, en fin d'été, à un effet direct de la coupe ; de toute façon, le pouvoir photosynthétique est fortement diminué.

f) *Etude synthétique du peuplement des talles.*

Il faut maintenant essayer de voir comment varient ensemble les différents paramètres descriptifs du peuplement des talles.

Evolution saisonnière.

La figure 16 retrace cette évolution pour la faible charge. Les critères retenus sont le pourcentage de bourgeons, le poids moyen d'une talle et le rapport F/C moyen d'une talle, qui constituent un espace à 3 dimensions. Chaque état instantané de la touffe est donné par un tétraèdre dont les sommets sont les coordonnées sur les 3 axes

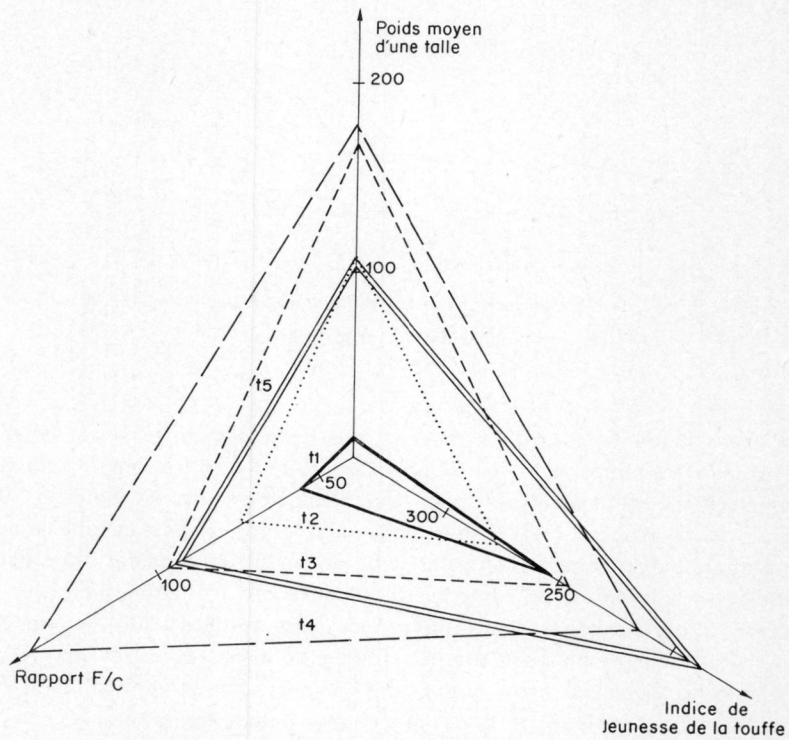


FIG. 16. — *Evolution de la structure du peuplement de talles au cours du cycle de la touffe* (Poids exprimés en mg de M.S.).

——— t1 : 28-5-74.
..... t2 : 11-6-74.
– – – – t3 : 30-7-74.
— — — t4 : 27-8-74.
═══ t5 : 25-9-74.

des 3 descripteurs. Le volume des tétraèdres s'accroît jusqu'en août et diminue pendant l'automne et l'hiver. En clair, la masse photosynthétisante et le poids des talles augmentent de mai à septembre, puis décroissent ; le pourcentage de bourgeons diminue en juin (crise du tallage) pour augmenter ensuite jusqu'à l'automne.

Influence des traitements agronomiques.

Dans le système de représentation ci-dessus, les traitements sont représentés par des tétraèdres contenus les uns dans les autres (fig. 17*a* et *b*). Du plus grand au plus petit, on a le classement suivant : 0, 5, 10 brebis/hectare ; et, pas de fauche, fauche en septembre, fauche en mai, fauche en juillet.

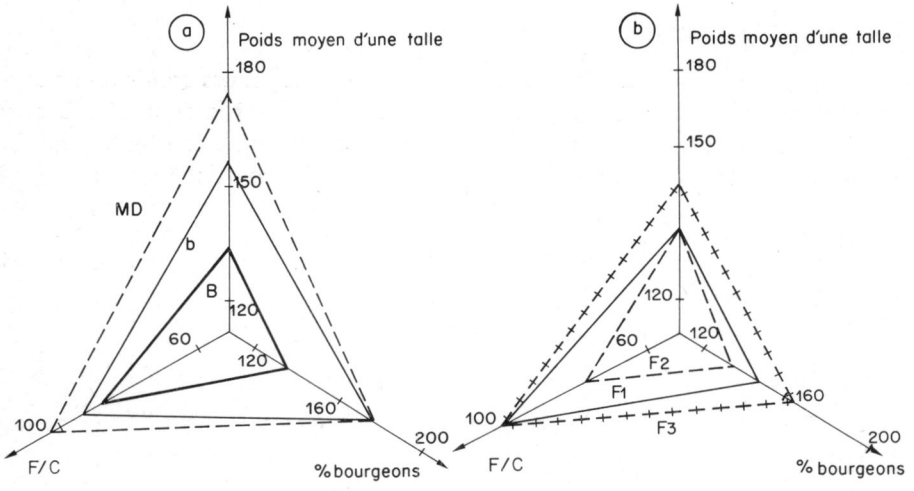


FIG. 17. — *Structure moyenne de la touffe* (Poids exprimés en mg de M.S.).

a) influence de la charge en brebis.
b) influence de la fauche.

Une autre méthode consiste à calculer des distances cartésiennes entre traitements. Dans un 1er temps, on calcule les distances entre le traitement faible charge pris comme référence et les autres, au sens de chacune des mesures (poids, p. 100 bourgeons, F/C), dans l'espace R^5 des temps. Dans un 2e temps, on peut ensuite calculer une distance globale entre traitements (distance de distance), au sens des 3 mesures effectuées. Dans ces conditions, on obtient dans l'ordre des traitements de plus en plus différents de la faible charge : forte charge (25), mise en défens (30), fauche de début de saison (41), fauche de fin de saison (42), fauche de milieu de saison (62). C'est donc la fauche à la floraison qui provoque les plus grands changements dans la structure de la touffe du Nard, par rapport à la faible charge prise comme référence.

Conclusion

Dans le cycle de la touffe de Nard, le phénomène le plus intéressant du point de vue agronomique est l'intensité de la reprise du tallage après floraison, qui conditionne la pérennité de l'espèce. Ce phénomène est en relation avec l'abondance et la

vigueur des talles de plus de 3 feuilles, capables de fournir des réserves aux jeunes talles en voie de formation. Pendant la sénescence de ces talles en août et septembre, les parties souterraines continuent certainement à assurer aux bourgeons une alimentation en hydrate de carbone et minéraux, issus pour une part d'une redistribution à partir des organes en train de mourir. C'est à cette époque que la touffe se régénère, mourant par ses parties vieilles, gagnant du terrain par ses parties jeunes extérieures.

Dans ces conditions, tous les traitements capables de léser les vieilles talles en juillet seraient favorables en s'opposant au tallage. Deux moyens sont mis en évidence par l'étude ci-dessus : la recherche de l'intensité de floraison maximale et la coupe à la floraison. La floraison monopolise les réserves des talles de plus de 3 feuilles et provoque leur mort. On l'obtient en pâture avec un fort chargement. La coupe à la floraison porte préjudice aux vieilles talles, diminue la production de bourgeons et provoque des compétitions entre les jeunes talles. De plus, elle renforce la floraison de l'année suivante, d'où une action à long terme.

Dans le peuplement, la fauche à la floraison se traduit par une division des anciennes touffes vigoureuses en de nombreuses petites touffes de structure plus vieille que la normale. A l'intérieur de la touffe, elle provoque une baisse de vigueur des talles par diminution du poids moyen et diminution du rapport des parties photosynthétisantes aux parties non chlorophylliennes.

En pratique, la meilleure exploitation en vue de l'éradication du Nard semble être un fort chargement avec fauche des refus à la floraison. Mais l'efficacité réelle du traitement sur l'évolution de la composition botanique n'est pas encore connue : quoiqu'elle ait des chances d'être la plus opérante, elle peut être faible. En effet, en 1er lieu, le Nard montre une plasticité qui pourrait être le signe d'une adaptation au traitement ; rien ne dit que le traitement qui induit les plus fortes modifications de structure de la touffe empêche complètement la perpétuation du peuplement. En 2e lieu, le succès du traitement dépend, pour une autre part, du comportement des espèces fourragères en compétition avec le Nard : ces espèces pourraient être aussi affectées que lui par la coupe.

Bien que la littérature ne mentionne pas d'expérimentation où la seule fauche à foin ou la seule pâture ait fait disparaître le Nard, *la combinaison fauche-pâture est le traitement qui a le plus de chance de réussir en absence d'engrais minéraux, et qui doit le mieux valoriser la fertilisation dans le cas contraire*. Différents systèmes d'exploitation en pâture avec fauche des refus ont été mis en place en 1975 pour répondre à ces questions. L'évolution de la composition botanique montrera les réactions du Nard placé en compétition avec sa flore compagne.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Remerciements

Cette étude est un prolongement aux recherches financées par la DGRST dans le programme « Equilibres biologiques-pâturages d'altitude ».

Summary

Tuft morphology and Nardus stricta *L. growth. Influence of grazing and mowing*

This study aimed at improving mountain grazings by the eradication of *Nardus stricta* L., a species left by the cattle.

The knowledge of the morphology and growth is a condition for the analysis in situ of the behaviour of tufts submitted to different agronomic treatments consisting in grazing and mowing. The existence of a critical point in the vegetative reproduction cycle allows to precise and to place in time the actions of the farmer which are the most likely to cause a weakening of White Bent.

Zusammenfassung

Morphologie des Büschels und Wachstum von Nardus stricta *L.*
Einfluss von Weide und Mähen

Diese Untersuchung bezieht sich auf die Verbesserung der Bergweiden durch die Entwurzelung von Nardus stricta L., einer durch das Vieh gelassenen Art.

Die Kenntnis der Morphologie und des Wachstums ist Bedingung für die in situ Analyse des Verhaltens von Bücheln bei verschiedenen Behandlungen wie Weiden und Mähen. Das Vorhandensein einer kritischen Phase im vegetativen Reproduktionszyklus erlaubt, die Eingriffe des Landwirts auf eine Zeitabschnitt zu beschränken und zu bestimmen, welche die besseren Aussichten haben, zu einer Abschwächung des Borstgrases zu führen.

РЕЗЮМЕ

Изучение биологии щети (*Nardus stricta*). — Влияние выпаса и укосов.

П. ЛУАЗО.

Щеть — вид травянистого растения с симподическим корневищем, произрастающий пучками. На горных пастбищах она представляет очень крупную вегетативную массу, не поедаемую пасущимися животными. Вегетативная регенерация играет наибольшую роль в постоянстве вида.

Первый опыт, проведенный в вегетативных сосудах при трех разных тепловых режимах, показал действие факторов среды на скорость роста листовых пластинок и появления листьев и корневых побегов в течении вегетативной фазы (Таблица 2). Следующее изучение проводилось на растительном материале собранном *in situ*. Пучки вырывались пять раз в течении активного вегетативного сезона, на делянках получавших следующие обработки : MD — без выпаса; *f* — выпас 5 овец/га; F — выпас 10 овец/га; F_1 — укос в мае месяце; F_2 — укос в июле; F_3 — укос в сентябре. Пучки эти разделялись затем на различные категории побегов : в каждой, отмечались число листьев, их общий вес, степень их высыхания и весовой процент живых листовых пластинок. Скорость возобновления побегообразования и мощность почек после цветения представляют два важнейших параметра постоянства пучка; интенсивность цветения и летнего фотосинтеза представляют большую важность для осенней вегетативной фазы. Анализ цикла развития по сравнению с контрольным вариантом *f* показывает что самые крупные нарушения проявляются в варианте укоса в июле месяце. Крупные нагрузки выпаса производят такое-же действие. Необходимо, значит, рекоммендовать комбинации сильных нагрузок выпаса с укосом в период цветения щети, для улучшения пастбищ на которых она произрастает.

Références bibliographiques

BLONDON F., 1964. Action de la nutrition minérale sur la floraison. *Bull. Ecole Nation. Sup. Agron. Nancy*, **6** (2), 101-108.

BLONDON F., 1965. Evolution des conceptions sur les exigences pour la floraison des graminées prairiales. *Bull. Ecole Nation. Sup. Agron. Nancy* **7** (2), 101-110.

BRYNMOR T., FAIRBAIRN C. B., 1956. The white Bent ; its composition, digestibility and nutritive value. *J. Brit. Grassld. Soc.*, **11** (4), 230-235.

CHADWICK M. J., 1960. *Nardus stricta* L. *J. Ecol.*, **48** (1), 255-267.

CUSSET G., LACHAPELLE B. de, 1961. Etudes Botaniques dans les Monts Dore. *Rev. Sci. Nat. Auvergne* **28,** 1-2-3-4, 15-81.

DELPECH R., 1975. *Contribution à l'étude expérimentale de la dynamique de la végétation prairiale.* Thèse, Orsay, **103,** 24-28.

GILLET M., 1969. Sur quelques aspects de la croissance et du développement de la plante entière de graminée en conditions naturelles : *Festuca pratensis* Huds. I. Construction de la touffe. *Ann. Am. Plantes*. **13** (2), 107-150.

GILLET M., 1970. Sur quelques aspects de la croissance et du développement de la plante entière de graminée en conditions naturelles : *Festuca pratensis* Huds. Thèse de doctorat d'Etat. Faculté des Sciences de Poitiers, 130-163.

GILLET M., GACHET J. P., GALLAIS A., 1969. II. La crise du tallage. *Ann. Am. Plantes*, **19** (2), 151-168.

GINSBURGER G., 1974. *Essai de modélisation d'une population de Dactyle en phase végétative.* Thèse 3e *cycle*, Université de Strasbourg.

HEGI G., 1935. *Illustrierte, Flora von Mittel-europa* B. I. 2e éd. J. F. Lehmans. Münich, 477-480.

JEWISS O., 1972. Tillering in grasses. Its significance and control. *J. Brit. Grassld. Soc.*, **27** (2), 65-82.

KING J., 1960. Observations on the siedling establishment and Growth of *Nardus stricta* in burned Callunetum. *J. Ecol.*, **48** (3), 667-677.

KLAPP E., 1950. Borstgrasheiden der Mittelgebirge, Entstehung, Standort, Wert und Verbesserung. *Z. Acker u. Pflanzenbau*, **93,** 400-444.

LIDTKE W., MIKOLAJCZAK Z., 1972. Comparison of some methodes of bent grass (*Nardus stricta* L.). Control in the Sudet region of Poland. *Inst. Banska Bystrica, Tchecosl., Bratislava*, 163 p., 125-138.

LOISEAU P., BECHET G., 1975. Implications agronomiques de la sélection alimentaire exercée par les ovins sur les constituants d'une végétation pâturée. *Ann. agron.*, **26** (3), 289-309.

LUDI W., 1941. Alpweide verbesserungsversuche auf der Schinigeplatte bei Interlaken., *Mitt Naturges.* Bern., 18-20.

LUQUET A., 1926. Esquisse phytogéographique du Massif des Monts Dore. *Revue Géogr. Alpine*, **14** (3), 513-572.

De MONTARD F. X., GACHON L., 1976. Les pâturages d'altitude des Monts Dore. Recherches sur l'écologie des principaux faciès de végétation pastorale (publication en cours).

NIEDERMAIER K., 1972. Some results in Bent grass control conducted according to the common method in Roumania in 1963-1967. *Inst. Banska Bystrica.* Tchecosl. Bratislava, 163 p., 139-156.

PERKINS D. F., 1968. Ecology of *Nardus stricta* L. I. Annual Growth in relation to tiller phenology. *J. Ecol.* G. B., **56** (3), 633-646.

PERSIKOVA Z. I., 1969. The formation of turf beds and the life-cycle of *Nardus stricta. Biulleteni M. O-va isp. prirodi, otd. biologii*, **64** (5), 61-68.

POISSONET P., POISSONET J., 1969. Etude comparée de diverses méthodes d'analyse de la végétation des formations herbacées denses et permanentes. *CEPE-Document* n° 50, 119 p. Montpellier.

QUEZEL P., RIOUX J. A., 1954. L'étage subalpin dans le Cantal. *Végétatio* **4** (6), 345-378.

SAINT CHAMANT F. C., 1956. Amélioration et régénération des pâturages de montagne. *Bull. Féd. Franç. Alp.*, **7,** 405-411.

WILSON J. R., 1959. The influence of time of tiller origin and nitrogen level on the floral initiation and ear emergence of four pasture grasses. *N. Z. J. Agric. Res.*, **2,** 915-932.

Ann. agron., 1977, **28** (2), 215-226.

Etude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine

Deuxième partie

Analyse expérimentale des dégâts causés par un vent accidentel (le Zonda) sur un verger de pruniers

SIMON J. C., DELECOLLE R.

Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A., 84140 Montfavet

Résumé

Les dégâts causés par le Zonda (vent local en Argentine) sur les feuilles de pruniers sont très importants. Les arbres exposés sont particulièrement endommagés du côté au vent et, à un degré moindre, du côté sous le vent. Une protection mutuelle des arbres est mise en évidence, mais celle-ci s'avère insuffisante pour le prunier, espèce apparemment très sensible aux dégâts foliaires. Les dommages mis en évidence ne sont pas généralisables aux autres espèces. Aussi une analyse comparative des sensibilités de diverses espèces aux défoliations devrait permettre de définir les espèces les moins fragiles pouvant servir de protection à d'autres plus sensibles.

I. — Introduction

La réduction des dégâts mécaniques dus au vent à l'aide de brise-vent, soulignée par Guyot (1963) prend toute son importance dans les régions balayées par des vents accidentels et violents. Aussi, le problème de la protection des cultures se pose-t-il de façon aiguë en Argentine dans les provinces de San Juan et Mendoza (situées au pied des Andes) où souffle le vent Zonda.

Le vent Zonda, dont les caractéristiques essentielles ont été exposées dans un premier article (1), se présente comme un vent accidentel, violent, sec et chaud, généralement chargé de poussières. Aux modifications importantes et brutales des facteurs climatiques qu'il entraîne, il faut ajouter son pouvoir destructeur et abrasif, qui provoque des effets dépressifs importants sur la production agricole. Les dégâts observés à la suite d'un Zonda touchent en effet toutes les parties aériennes des plantes : le tronc et les ramifications (bris, flétrissement des extrémités non lignifiées), les feuilles

(1) Cf. « Effets des brise-vent sur la croissance et le développement d'une culture type : la vigne », *Ann. agron.*, 1977, **28** (1), 75-93.

(déchirement du limbe, flétrissement temporaire ou permanent), les fleurs (coulure et les fruits (chutes importantes).

Ces différents dommages contribuent pour une bonne part à l'irrégularité de la production agricole de ces provinces. Ceci est d'autant plus important que la province de Mendoza est la première province viticole et fruitière d'Argentine. Une protection des cultures vis-à-vis du Zonda, à l'aide de brise-vent naturels, est donc nécessaire dans ces régions, d'où un ensemble d'études développées sur ce thème par l'I.N.T.A. (Instituto Nacional de Technologia Agropecuaria).

Dans cette étude, nous insisterons particulièrement sur l'importance des dégâts causés au niveau des feuilles par le Zonda (un violent Zonda de direction W.S.W. ayant soufflé le 23 novembre 1974), le dispositif expérimental utilisé ne permettant pas de tester efficacement l'effet protecteur des brise-vent.

II. — Méthodes expérimentales et statistiques

Nous présenterons, dans un premier temps, la méthode expérimentale utilisée et, dans un deuxième temps, la méthode statistique employée : l'analyse factorielle des correspondances.

2.1. — *La méthode expérimentale*

2.1 1. *Choix de la parcelle.*

Faute de trouver une parcelle correspondant à nos exigences (grand axe parallèle au vent Zonda et brise-vent perpendiculaire à cette direction), nous avons retenu une parcelle presque totalement exposée au Zonda. La figure 1 présente la totalité de cette parcelle : elle est étroite (35 mètres) et très longue (200 mètres). Elle est bordée à l'Ouest d'un brise-vent dont la hauteur moyenne est égale à 10 mètres. Ce brise-vent, limité à la largeur de la parcelle, protège une zone excessivement restreinte.

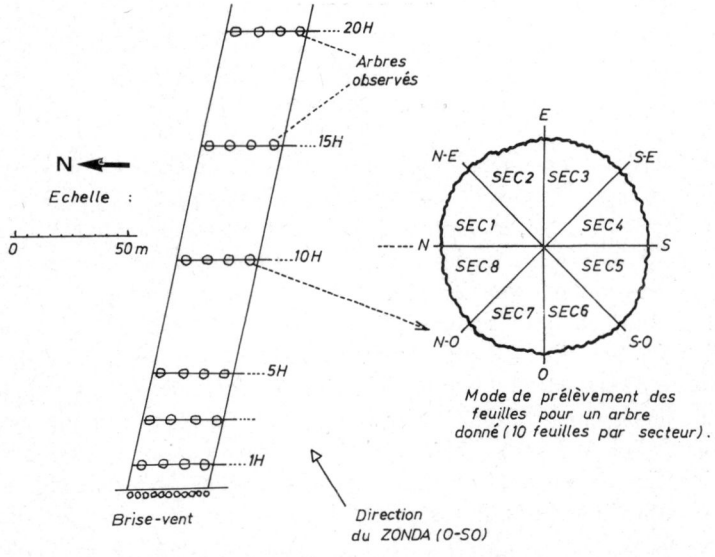


FIG. 1. — *Plan expérimental d'étude des effets du Zonda sur les surfaces des feuilles d'une culture de pruniers.*

La parcelle porte une culture de pruniers (variété Pond's Seedling), dont la hauteur moyenne est de l'ordre de 3 mètres. Elle est entourée : au Nord et à l'Est par de jeunes pêchers (hauteur 1,50 mètre), au Sud et à l'Ouest par des vignes basses (hauteur 0,80 mètre).

2.1 2. *Le plan expérimental.*

Le prélèvement a été effectué quelques jours après le passage du Zonda, selon le protocole suivant :

— Récolte des feuilles sur des arbres situés aux distances 1 H, 3 H, 5 H, 10 H, 15 H et 20 H du brise-vent (exprimées en multiples de la hauteur H de celui-ci), distances préconisées par Delécolle (1974). Cette répartition permet plus d'assurer un quadrillage de la parcelle que de mettre en évidence l'effet protecteur du brise-vent (le grand axe de la parcelle n'étant pas parallèle au vent).

— Prélèvements sur 4 arbres par distance, pour montrer une éventuelle hétérogénéité intra-distance (la répartition des arbres étudiés est identique pour toutes les distances).

— Sur chaque arbre, la récolte est effectuée selon 8 secteurs orientés suivant les 8 points cardinaux, afin de faire apparaître un possible effet d'autoprotection à l'intérieur d'un arbre. Pour chaque secteur, 10 feuilles sont prélevées au hasard.

Ce plan d'expérience a été conçu pour mettre si possible en évidence 3 types d'effets sur les surfaces des feuilles :

— intra-arbre (autoprotection dans un arbre)
— intra-distance (protection mutuelle des arbres)
— accroissement inter-distance (la protection par le brise-vent étant limitée aux distances 1 H et 3 H).

2.1 3. *Méthode d'estimation des surfaces des feuilles.*

La surface de chaque feuille a été déterminée par la méthode classique « Copie-Pesée ».

Cette méthode donne une meilleure estimation des surfaces des feuilles qu'une méthode par pesée directe, car une fois lésées, les feuilles s'épaississent. Il en résulte une mauvaise corrélation poids-surface.

Compte tenu de l'extrême sensibilité des feuilles de pruniers au déchirement, l'effet du Zonda a pu être assez bien appréhendé par la méthode utilisée, les lambeaux de feuilles étant emportés par le vent.

2.2. — *La méthode statistique*

La direction du vent n'ayant pas été orthogonale au plan d'expérience, l'analyse statistique des données posait un problème. La difficulté a été tournée en faisant appel à une méthode descriptive : « l'analyse factorielle des correspondances », dont le principe est exposé dans Lebart et Fénelon (1971).

2.2 1. *Principe général.*

Cette méthode permet d'obtenir une description d'un tableau de nombres homogènes et positifs (ici, le tableau formé par les surfaces moyennes des 10 feuilles préle-

vées par secteur, une ligne du tableau représentant l'ensemble des surfaces moyennes observées sur un arbre, et une colonne, l'ensemble des surfaces moyennes observées sur un secteur).

2.2 2. *Programmation* (1) *et codages.*

Les points-arbres seront nommés par leur distance au brise-vent et par le numéro de l'arbre auquel ils appartiennent (cf. fig. 3).

Exemple :

	Arbre 1	Arbre 2	Arbre 3	Arbre 4
Distance 1 H	1 H 1	1 H 2	1 H 3	1 H 4
Distance 20 H ...	20 H 1	20 H 2	20 H 3	20 H 4

Les points secteurs seront nommés par « SEC » (abréviation de Secteur) et par un numéro correspondant à une orientation précise (cf. fig. 1).

Secteur Nord-NE	= SEC 1	Secteur Sud-SO	= SEC 5
Secteur NE-Est	= SEC 2	Secteur SO-Ouest	= SEC 6
Secteur Est-SE	= SEC 3	Secteur Ouest-NO	= SEC 7
Secteur SE-Sud	= SEC 4	Secteur NO-Nord	= SEC 8

III. — Résultats

3.1. — *Analyse topographique des surfaces moyennes des feuilles par arbre*

Une cartographie, établie à partir des surfaces moyennes des feuilles des arbres, met en évidence une distribution topographique de ces dernières (fig. 2).

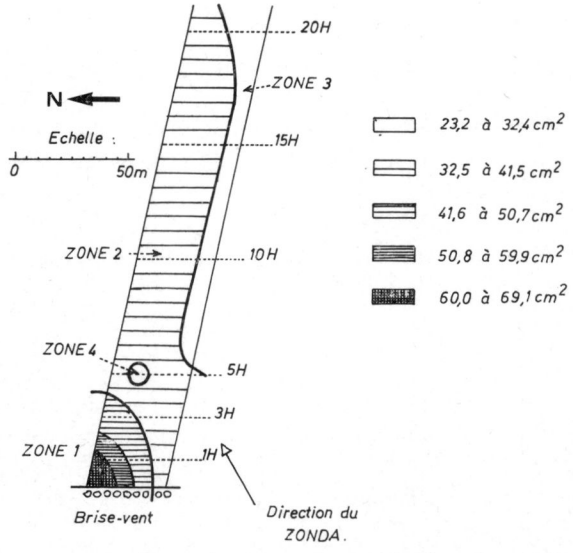


FIG. 2. — *Cartographie des surfaces moyennes des feuilles par arbre.*

(1) Le programme utilisé est le programme TABET du Laboratoire de Biométrie du C.N.R.Z. (Jouy-en-Josas, France).

Quatre zones peuvent être définies sur la parcelle :

— une zone adjacente au brise-vent (zone 1) où les surfaces des feuilles sont les plus importantes ;

— une bordure (zone 3), du côté au vent, où les surfaces des feuilles sont les plus faibles ;

— un prolongement de la bordure vers le centre de la parcelle (zone 4) ;

— une zone occupant le reste de la parcelle (zone 2), où les surfaces des feuilles sont intermédiaires.

Cette première analyse, de caractère global, met en évidence 2 effets :

— un effet « diagonal » sur la parcelle, qui s'exprime par une augmentation des surfaces quand on pénètre dans la parcelle dans le sens du vent, dans la zone non protégée par le brise-vent ;

— un effet protecteur du brise-vent, qui se traduit par une augmentation des surfaces des feuilles dans sa zone d'influence.

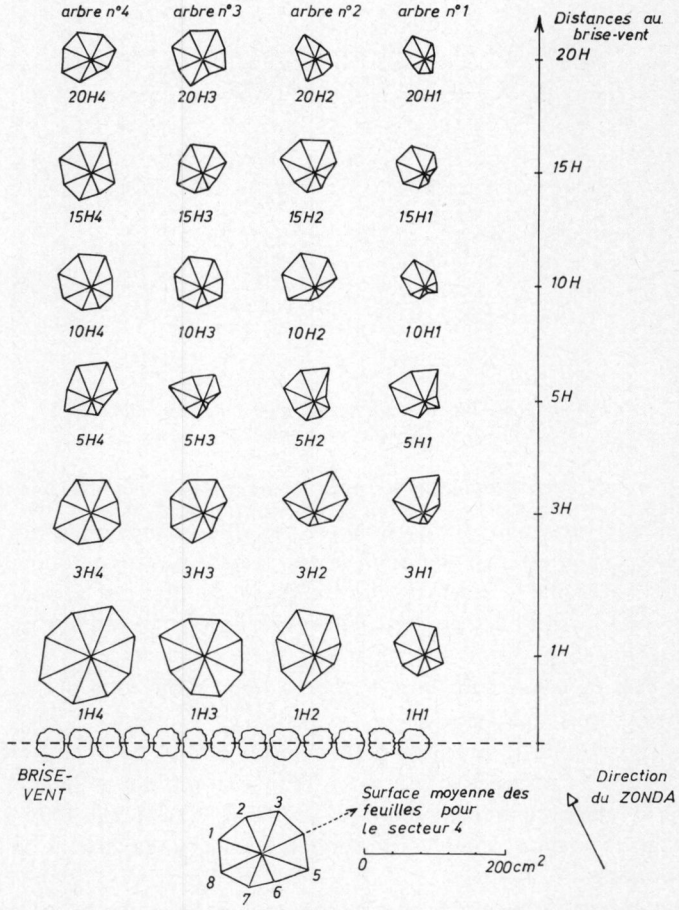


FIG. 3. — *Surfaces moyennes des feuilles suivant les 8 secteurs, pour tous les arbres étudiés.*

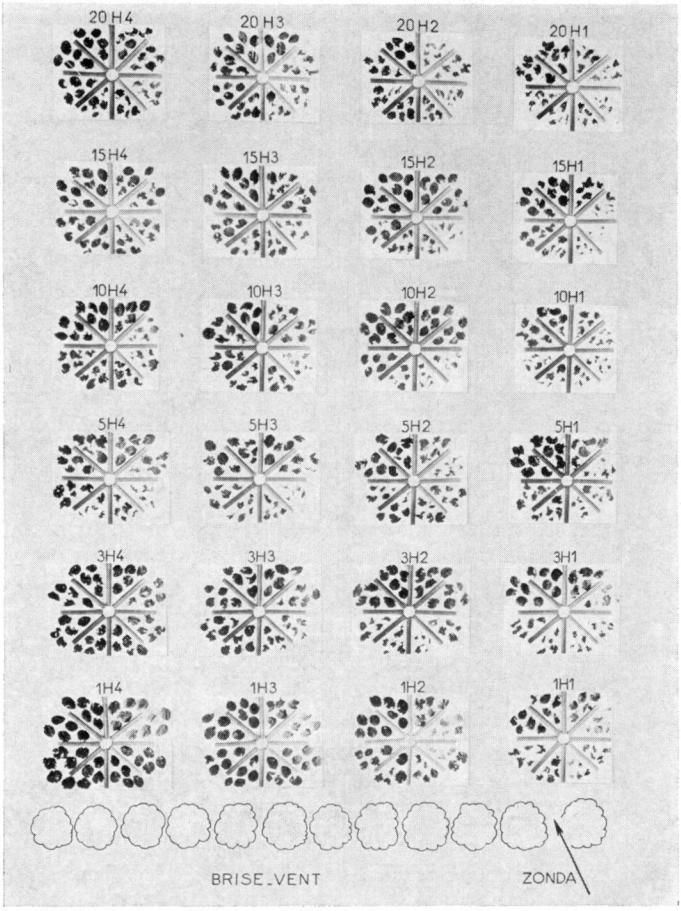


FIG. 4. — *Photographie d'une partie des feuilles échantillonnées (5 feuilles sur 10 sont représentées par secteur).*

3.2. — *Analyse topographique des surfaces moyennes des feuilles par secteur*

L'origine de la répartition topographique des valeurs moyennes des surfaces des feuilles peut être expliquée par une analyse par secteur des dommages causés par le vent. La figure 3 présente les surfaces moyennes des feuilles par secteur. La figure 4 montre, pour tous les secteurs étudiés, l'état de cinq des 10 feuilles qui ont servi à établir les moyennes.

L'analyse fine de cette répartition topographique a été faite par l'intermédiaire de l'analyse des correspondances.

La figure 5 présente le premier plan factoriel extrait par l'analyse du tableau croisant les 24 arbres et les 8 secteurs. Ce plan extrait 73 p. 100 de l'information contenue dans le tableau initial (1er axe 54,3 p. 100 ; 2e axe 18,3 p. 100). On peut donc affirmer que la projection obtenue représente sans grande distorsion la structure interne des données.

Si l'on s'intéresse d'abord aux points représentant les secteurs, on constate qu'ils sont dispersés sur l'ensemble du graphique, ce qui montre que les répartitions des

surfaces des feuilles sont différentes suivant les arbres, et qu'il n'y a donc pas homogénéité des dégâts dans l'ensemble du verger. Cependant, la proximité entre SEC 5 et SEC 6 montre que ces secteurs ont eu des réactions très semblables sur l'ensemble des arbres. La même remarque vaut pour SEC 1 et SEC 2. On notera également que SEC 8 est mal décrit par ce plan, ce qui signifie que la variabilité observée sur ce secteur est hiérarchiquement moins importante que les autres.

On peut ensuite interpréter la position des points arbres en fonction de la structure des points secteurs, on délimite ainsi grossièrement 4 groupes de points (voir fig. 5) :

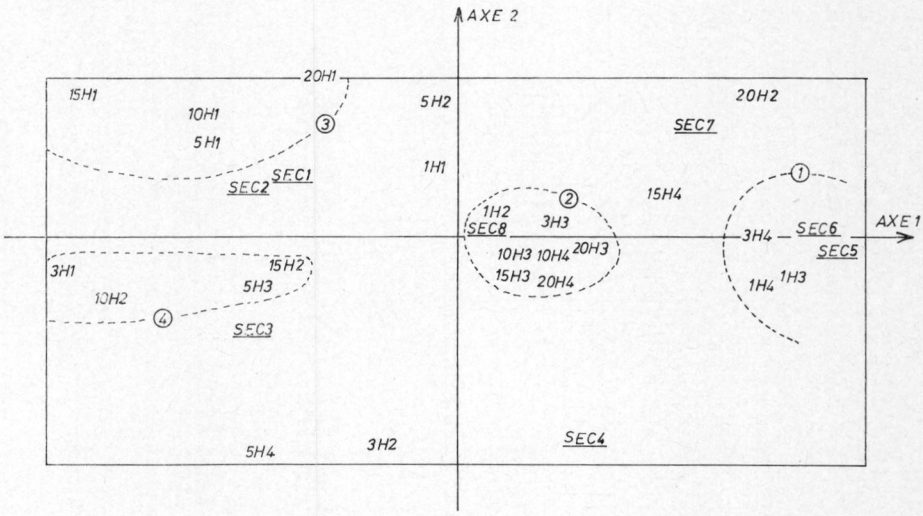


FIG. 5. — *Premier plan factoriel de l'analyse des surfaces des feuilles par secteur.*

— Le groupe (1) rassemble des points qui ont la plus forte réponse aux secteurs 5 et 6, et sont donc les plus protégés, vu la direction initiale du Zonda. En fait, ces points sont ceux qui sont le mieux protégés par le brise-vent.

— Le groupe (2) comprend des points proches de l'origine des axes, donc présentant, soit des destructions moyennes sur l'ensemble des secteurs, soit une surface des feuilles plus importante sur le secteur 8 que sur les autres secteurs : il s'agit là de points moins bien protégés que les précédents :

- 1 H 2, qui n'est qu'imparfaitement abrité par le brise-vent de l'attaque diagonale du vent,
- 10 H 3, 10 H 4, 15 H 3, 20 H 3, 20 H 4, dont on peut dire qu'ils ont conservé une surface des feuilles relativement importante dans les secteurs 5 et 6.

On remarquera également 15 H 4, point bénéficiant de l'abri des autres rangées d'arbres, et dont les réactions sont intermédiaires entre le groupe (1) et le groupe (2).

— Le groupe (3) réunit des points qui n'ont de fortes surfaces des feuilles que dans les secteurs 1 et 2, secteurs opposés à l'action du vent : il s'agit donc là d'arbres très exposés.

On remarquera la position de 1 H 1, terme de passage entre les groupes (2) et (3), qui se comporte donc comme un arbre à la fois assez protégé (action du brise-vent) et exposé (point d'attaque du vent).

— Le groupe (4) enfin, se compose de points ayant une plus forte surface des feuilles sur le secteur 3, avec également (pour 5 H 3 et 15 H 2) une réponse assez forte aux secteurs 1 et 2 : il s'agit donc d'arbres qui ont moins souffert que ceux du groupe précédent. On notera également la position des points 3 H 2 et 5 H 4, qui présentent des surfaces des feuilles plus importantes sur le secteur 4.

Le report de ces groupes sur le plan de la parcelle permet d'obtenir la zonation représentée sur la figure 6.

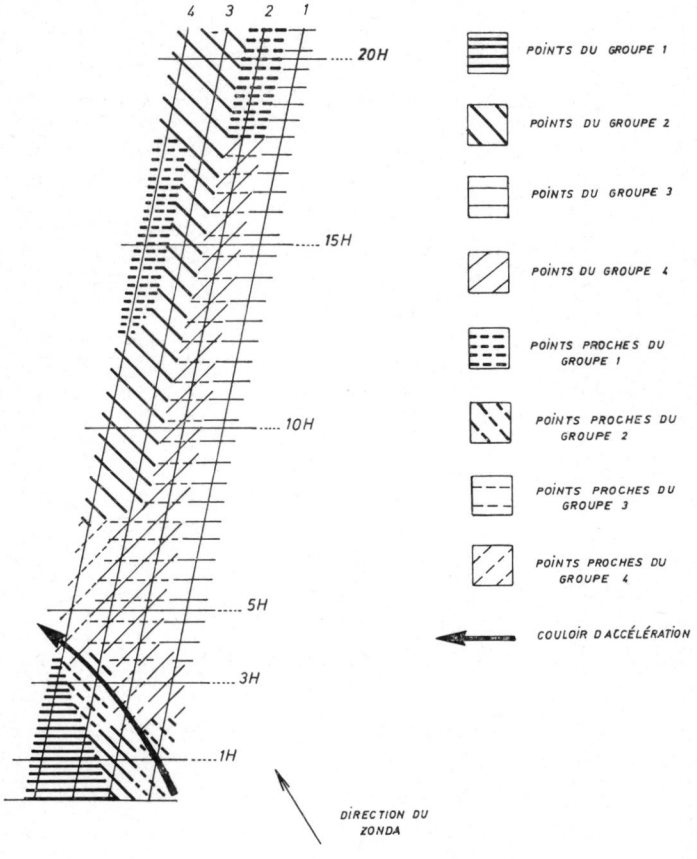


FIG. 6. — *Zonation de la parcelle d'après les résultats de l'analyse des correspondances.*

Cette partition de l'ensemble des arbres de la parcelle permet de tirer plusieurs conclusions :

a) Hiérarchiquement, la protection par le brise-vent (points du groupe (1)) est plus efficace que la protection mutuelle entre arbres (points du groupe (2)). Dans la zone protégée par le brise-vent et la zone de protection mutuelle, la variation par

secteur est peu marquée, bien que la surface moyenne des feuilles par arbre soit sensiblement supérieure derrière le brise-vent (cf. fig. 3).

b) On peut distinguer un gradient à l'intérieur de la protection mutuelle elle-même, d'abord des arbres très exposés (groupe (3)), puis des points protégés par les précédents (groupe (4)), puis enfin des points protégés par l'ensemble (groupe (2)).

La relative homogénéité des arbres des rangées 3 et 4 conduit à penser qu'il y a eu, dans cette zone, une certaine stabilisation de la force destructive du vent, et donc un palier dans la réduction de sa vitesse à l'intérieur du couvert végétal.

On observe également un gradient de destruction au niveau 1 H, beaucoup plus fort, dû à la direction d'incidence du vent.

c) Les réactions très différentes de points proches : 3 H 1, 3 H 2, 5 H 3, 5 H 4 qui ont leur plus forte surface sur le secteur 3, 1 H 1, 1 H 2, 3 H 3, qui l'ont sur le secteur 8 opposé au précédent, incitent à postuler l'existence d'un couloir de propagation privilégiée dans la parcelle (cf. flèche sur la figure). Dans ce couloir, le vent semble avoir une force destructive plus grande, comparativement aux autres zones de la parcelle. Ceci est probablement dû à une accélération du vent créée par la présence de l'extrémité du brise-vent.

IV. — Interprétation et discussion

4.1. — *Interprétation des zones observées*

L'interprétation des effets observés au niveau des surfaces des feuilles peut se faire en comparant les figures 2, 4 et 6.

Zone 1 : *Protection des arbres par le brise-vent.*

Cette zone correspond aux arbres du groupe 1 (fortes surfaces des feuilles pour les secteurs au vent). Le Zonda, ralenti par le rideau d'arbres, provoque très peu de dommages sur les feuilles. Cette zone est d'importance restreinte, le brise-vent ne jouant qu'un rôle limité.

Zone 2 : *Protection mutuelle des arbres.*

Cette zone correspond aux arbres du groupe 2 et proches du groupe 1 (destructions foliaires moyennes sur l'ensemble des secteurs). Le Zonda, ralenti par les arbres de bordure, provoque peu de dommages dans cette zone : les arbres y bénéficient d'une protection mutuelle.

Zone 2 bis : *Zone de transition.*

Cette zone, uniquement définie d'après les résultats de l'analyse des correspondances (elle n'est pas représentée sur la fig. 2), est intermédiaire entre la bordure de la parcelle et la zone de protection mutuelle. Elle réunit les arbres appartenant au groupe 4 et proches du groupe 3.

Zone 3 : *Bordure de la parcelle.*

On trouve ici les arbres du groupe 3 (fortes surfaces foliaires uniquement pour les secteurs sous le vent). Dans cette zone, la vitesse du Zonda est très grande. Les

dégâts sont très importants face au vent (de nombreuses feuilles sont réduites à des morceaux de limbe adjacents à la nervure principale).

Zone 4 : Couloir d'accélération du Zonda.

A l'extrémité Sud du brise-vent, il se produit une accélération du vent, qui permet à celui-ci de s'engouffrer plus profondément dans la culture. Ceci explique les dommages enregistrés à 5 H 3 et 5 H 4, arbres qui auraient dû, en principe, bénéficier de la protection mutuelle.

4.2. — *Conséquences possibles des défoliations causées par le Zonda*

L'observation de la figure 4 met en lumière des réductions de surfaces des feuilles remarquables. Les secteurs les plus touchés (face au vent, sans protection) présentent des feuilles dont les surfaces ont été amputées jusqu'à 75 p. 100 de leurs valeurs. Il est alors aisé d'imaginer les suites possibles de ces défoliations.

— Conséquence directe sur la production présente : la diminution des surfaces assimilatrices entraîne une réduction des quantités de sucres synthétisés, donc une alimentation probablement réduite des fruits restants. Néanmoins, cet effet est sans doute tamponné par les chutes de fruits concomitantes aux défoliations.

— Conséquence indirecte sur la production à venir : cette conséquence, beaucoup plus discrète, n'en est peut-être pas moins la plus grave. Di Cesare (1975) a en effet, pu montrer l'incidence de l'ablation des feuilles 4 mois avant la chute normale, sur la croissance et le développement des bourgeons à fleurs de l'année suivante : cette ablation provoque un retard de développement important. A la limite, on peut imaginer qu'une défoliation très précoce (ici au printemps), perturbe complètement l'évolution des bourgeons à fleurs et se traduise par un arrêt du développement, dont la conséquence pratique est une perte de production pour l'année suivante.

Il est important de signaler que ces effets néfastes du Zonda ne sont pas généralisables à toutes les espèces fruitières. Nous avons pu en effet constater sur des pommiers situés dans une zone voisine aux pruniers de la bordure, que les dégâts sur feuilles étaient peu marqués. Il existe certainement une sensibilité différente des espèces aux défoliations, fonction de la résistance au déchirement du limbe. Une étude comparative des sensibilités aux défoliations pourrait aboutir à déterminer les espèces résistantes, ou moins sensibles, qui serviraient de protection aux espèces plus fragiles.

V. — Conclusion

L'étude entreprise a permis de mettre au point une méthodologie originale pour mettre en évidence les dégâts mécaniques dus au vent, au niveau des feuilles. Elle a également permis de caractériser l'effet d'autoprotection d'un verger et, dans une certaine mesure, de préciser l'effet protecteur d'un brise-vent.

Cette seule expérience nous permet uniquement d'entrevoir l'effet protecteur des brise-vent vis-à-vis des dégâts mécaniques causés par le vent Zonda. Par contre, elle ne nous permet pas d'apprécier l'importance de cet effet. Aussi, dans les études à venir, devra-t-on s'efforcer de quantifier la réduction des dommages et de préciser le rayon d'action des brise-vent.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Study of windbreaks effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina

II. Experimental study of damages induced by an accidental wind (the Zonda) on plum trees orchard

The Zonda (a local wind in Argentina) induces very important damages on leaves of plum trees. Exposed trees are particularly injured to windward and in a less important proportion to leeward. A mutual protection between trees is shown which seems to be insufficient for this sensitive species. These effects cannot be directly extended to other species. A comparative study of sensitivity of various species to leave injuring would be necessary to define the most resistant. These might be used to protect sensitive ones.

Zusammenfassung

Untersuchung der landwirtschaftlichen Einflüsse von Widschirmen auf den bewässerten Flächen des Mittel-westens Argentiniens

Zweiter Teil : experimentelle Analyse der von einem zufälligen Wind (Zonda) bedingten Schäden in einem aus Pflaumenbaümen bestehenden Obstgarten

Die durchden ZONDA (Ortswind in Argentinien) auf Pflaumenbaumblättern verursachten Schäden sind sehr bedeutend. Die gefährdeten im Winde stehenden Baüme sind besonders beschädigt und die im Windschatten stehenden Baüme weniger. Ein gegenseitiger Schutz der Baüme wurde festgestellt, aber dieser erweist sich ungenügend für den Pflaumenbaum, eine offenbar gegen Blattschäden sehr empfindliche Art. Die festgestellten Schäden können nicht bezüglich andere Arten verallgemeinert werden. Demzufolge sollte eine Vergleichsanalyse der Empfindlichkeiten verschiedener Arten gegen Entblätterung ermöglichen, die am wegnigstem empfindlichen Arten zu bestimmen, die als Schutz für empfindlichere Arten dienen können.

РЕЗЮМЕ

Изучение агрономического влияния ветровых щитов в орошаемых перимет рах Центра Западной Аргентины. — II. Экспериментальный анализ повреждений вызванных случайным ветром (зонда) в сливовых садах.

Ж. К. СИМОН, Р. ДЕЛЕКОЛЛЬ.

Зонда (местный аргентинский ветер) вызывает сильные повреждения листьев сливы. Особенно повреждаются деревья со стороны подветренной, и немного меньше с противуположной стороны. Существует, правда, взаимозащита между деревьями, но ее недостаточно в случае сливы, вида кажется сильно нодверженного листовым повреждениям, которые невозможно обобщить на другие виды. Поэтому сравнительный анализ чувствительности разных видов к дефолиации, должен будет определить виды наименее слабые, способные служить защитой для других, более чувствительных.

Références bibliographiques

ARNAL G., 1975. Communications personnelles.

ASLYNG H. C., 1958. Shelter and its effect on climate and water balance. *Oikos*, **9**, 382-402.

BATES C. G., 1944. The windbreak as a farm Asset. *Farmer's Bulletin*, U. S. Department of Agriculture, n° 1405.

BENZECRI J. P., 1973. *L'analyse des données*. Paris, Dunod, t. 1 : 615 p. ; t. 2 : 619 p.

CAPITANELLI R. G., 1967. *Boletin de estudios geograficos*, Universidad Nacional de Cuyo. Vol. XIV n° 54-57, 281-307.

DELECOLLE R. et SIMON J. C., 1974. *Contribution à l'étude des effets des talus boisés sur une culture de Maïs en pays bocager de climat atlantique*. Thèse, Université de Rennes, 340 p.

DI CESARE L., 1975. Communications personnelles.

GEORGII W., 1953. Dinamica del viento Zonda. *Anales de Departamento de Investigaciones cientificas*, t. 1, Cuad. II, Mendoza, 189-199.

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. *Ann. agron.*, **14** (4), 429-498.

GUYOT G., 1972. *Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente*. Université de Paris VI, Thèse de Docteur-Ingénieur.

LEBART et FÈNELON J. P., 1971. *Statistiques et Informatique appliquées*. Paris, Dunod, 426 p.

NAGELI W., 1942. Importance des rideaux d'arbres contre le vent pour la protection des cultures agricoles. *Journal Forestier Suisse*, n° 93, 1-20.

STAPLE W. J. et LEHANE J. J., 1955. The influence of yield shelterbelts on wind velocity, evaporation, soil moisture and crop yield. *Canad. J. Agric. Sci.*, **35** (5), 440-453.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, desssins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 PARIS. — 4-1977

Dépôt légal : 2e trimestre 1977. N° d'Impression : 24484

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1977

Vol. 28. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1977, **28** (3), 227-259.

Un essai d'entretien du sol en verger de pommiers

R. GRAS * et S. TROCMÉ **

avec la collaboration technique de R. DARTHOUT ** et J. OUDARD **

* *Station d'Agronomie, I.N.R.A., 06602 Antibes*
** *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles

Résumé

Dans un essai d'entretien du sol de verger, deux ensembles de traitements ont été comparés au moyen d'un dispositif à parcelles subdivisées (split-plot). Les traitements principaux étaient : sol travaillé avec enherbement spontané d'hiver, sol travaillé avec engrais vert d'hiver, désherbage chimique, gazon, et les traitements secondaires deux doses d'azote.

Cet essai qui a duré neuf ans a permis de suivre les évolutions des propriétés du sol, de la nutrition et du rendement des pommiers.

Dans les conditions de cet essai (région parisienne, pas d'irrigation) le rendement le plus élevé correspondait au désherbage total, et le plus bas au gazon.

Introduction

En arboriculture, on désigne couramment par *entretien du sol* l'ensemble des techniques permettant de maintenir et au besoin d'améliorer la part de productivité qualitative et quantitative d'un verger dépendant du sol, de faciliter la conduite du verger et éventuellement de maintenir en état le sol pour des cultures ultérieures.

Les techniques utilisées ou utilisables sont extrêmement nombreuses, surtout si on prend en compte leurs combinaisons dans l'espace (par exemple désherbage sur la ligne, travail dans l'interligne) ou dans le temps (travail du sol en été, plante de couverture en hiver).

L'essai cultural dont on donne ici les résultats et les conclusions a été réalisé pour comparer l'influence de techniques d'entretien du sol sur la production et permettre ainsi d'avancer dans la compréhension des divers effets possibles des modes d'entretien. Dans un souci d'analyse, cet essai s'est limité à la comparaison de modes d'entretien simples présentant des caractères extrêmes (sol nu désherbé, engazonnement permanent) et de modes d'entretien en combinaison (sol nu travaillé en été et portant une plante de couverture en hiver, sol nu travaillé en été).

Les premiers résultats ont fait l'objet de plusieurs publications : Monnier et Gras, 1965 ; Gras, 1965 ; Trocmé, 1966 ; Gras, Schmitlin et Trocmé 1966 ; Trocmé et Gras, 1966.

Nous les rappelons succinctement :

Deux années après l'installation de l'essai et par rapport au témoin sol nu travaillé :

— le gazon a provoqué une amélioration des propriétés physiques de la couche de surface ; il a réduit l'absorption d'azote, de phosphore et de potassium, ainsi que les rendements.

— Le désherbage total par voie chimique a eu comme conséquence une nette dégradation des propriétés physiques, tandis que la nutrition minérale avait tendance à devenir meilleure ; les rendements n'étaient pas affectés.

— L'engrais vert d'hiver a amélioré temporairement les propriétés physiques, diminué la teneur en azote des feuilles et légèrement réduit les rendements.

L'essai ayant duré 9 ans, de 1962 à 1971, nous rassemblons dans ce mémoire l'ensemble des résultats en nous attachant plus particulièrement aux évolutions à long terme, à leurs explications et à leurs conséquences techniques.

Cette étude pluridisciplinaire a été réalisée en collaboration par divers laboratoires de l'I.N.R.A. (Versailles) : Laboratoire des Sols, Station d'Agronomie, Station de Malherbologie (B. Schmitlin), et la Direction des Services Agricoles de Seine-et-Marne, du moins tant que M. Boulay a appartenu à ce service.

En outre, certains points particuliers ont été étudiés par G. Monnier (propriétés physiques et engrais vert),[1] Mme G. Simon-Sylvestre (microbiologie) et C. Scotto la Massese (nématologie).

Dispositif expérimental et méthodes

Sans revenir aux considérations théoriques présidant à la conception d'un tel essai (Gras, 1965), nous en rappellerons brièvement les principaux traits.

1. — *Localisation, sol, matériel végétal*

Le verger est situé en Seine-et-Marne entre Nangis et Provins. Quoique relativement humide, cette région présente assez fréquemment des besoins d'eau pendant l'été ; à Coulommiers, pour des sols dont la capacité de réserve en eau facilement utilisable est de 150 mm, ces besoins sont de : 165 mm une année sur deux, 145 mm une année sur cinq (Darves-Bornoz *et al.*, 1964) ; l'évapotranspiration a été calculée par la formule de Turc (1961).

Le sol, constitué d'un horizon limoneux épais de 40 cm surmontant un horizon limono-argileux, a, sur les 80 cm exploités par les racines, une capacité de réserve en eau de 180 mm environ, donc une réserve facilement utilisable certainement inférieure aux 150 mm des calculs ci-dessus. Les besoins en eau indiqués sont donc des évaluations par défaut des besoins du verger, qui n'a pas été irrigué.

L'horizon superficiel a une structure continue à fragmentaire, à tendance phylliteuse près de la surface ; sa stabilité structurale est franchement mauvaise (log 10 I_S d'Hénin *et al.*, 1958 : 2,37). La teneur en matière organique totale était de 1,75 p. 100. La structure de l'horizon sous-jacent est continue à faiblement polyédrique avec un log 10 I_S de 2,08 ; les taches de rouille y sont nombreuses.

Les pommiers, Reinette du Canada greffés sur EMIX, ont été plantés en novembre 1958, à 3 m de distance sur des lignes écartées de 4 m ; ils sont conduits en haie fruitière.

2. — *Dispositif expérimental et interprétation statistique*

Le dispositif, à parcelles subdivisées, met en jeu 4 modes d'entretien du sol et 2 doses de fumure azotée ; les fumures potassiques ont été identiques pour tous les traitements ; Il n'a pas été appliqué de fumure phosphatée.

Les grandes parcelles, répétées 4 fois, portent 8 arbres en essai. Les traitements sont les suivants :

T : sol nu, travaillé du 1er avril au 30 octobre environ, sur 10-12 cm ; enherbement spontané d'hiver. Cette technique, très utilisée, est considérée comme témoin.

V : sol nu, travaillé en été, avec plante de couverture (ray-grass d'Italie) semée en septembre-octobre et enfouie début avril comme engrais vert. Premier semis le 31.10.1962.

D : sol nu, désherbé en fin d'hiver, à l'aide d'herbicides rémanents (atrazine à 5 kg/ha de matière active), et d'aminotriazole et 2-4 D en cours d'année. Premier apport le 18.3.1963.

G : gazon constitué d'un mélange de paturin et de trèfle blanc, plantes peu vigoureuses, fauchées à 3-4 cm chaque fois qu'elles atteignent 10 cm de haut ; herbe laissée sur place. Semis le 9.4.1963.

Chaque grande parcelle est subdivisée en deux plus petites, recevant soit une dose simple (N_1), soit une dose double de fumure azotée (N_2) uniformes pour tous les traitements. En principe, l'azote était apporté en trois fois, sous forme d'ammonitrate : 20 p. 100 en automne, 40 p. 100 l'hiver, 40 p. 100 à la nouaison. Pour la dose simple, les quantités appliquées annuellement ont varié de 40 kg N par ha les premières années à 100 kg par la suite. Des analyses de feuilles permettaient de considérer que les doses appliquées sur l'essai maintenaient l'alimentation azotée à des niveaux satisfaisants pour l'étude envisagée.

L'interprétation statistique a été faite de deux façons : comparaison de moyennes après analyse de variance, utilisation des comparaisons orthogonales ou contrastes (Dagnélie, 1969) (3 comparaisons correspondant aux 3 degrés de liberté disponibles du poste entretien du sol). On a considéré 3 groupes de comparaisons :

I
- travail du sol : (D, G) versus (T, V)
- végétation installée : (G, V) vs (T, D)
- interaction travail × végétation.

II
- absence totale de végétation : D vs (G, V, T)
- végétation spontanée et installée : T vs (G, V)
- durée de végétation installée : G vs V

III
- végétation permanente : G vs (V, T, D)
- effet désherbant : D vs (V, T)
- végétation temporaire spontanée et installée : V vs T.

L'interprétation a été faite sur la meilleure de ces comparaisons choisie sur des critères logiques (Gras, 1965).

3. — *Analyses et mesures*

3.1. *Caractéristiques (ou analyses) du sol.*

Densité apparente : méthode du cylindre.

Densité réelle : pycnomètre à air Beckman.

Porosité à l'air (p. 100 de volume apparent) : porosité totale diminuée du volume d'eau à la capacité au champ mesurés *in situ* à la fin de l'hiver.

Indice de perméabilité : hauteur (cm) de la lame d'eau infiltrée pendant 1 h dans un cylindre de 1 dm^2 de section, enfoncé de 6 cm dans le sol et dans lequel on maintient un plan d'eau à 3 cm au-dessus du niveau du sol (méthode Muntz).

Matières organiques : carbone total (Anne, 1945) ; séparation des fractions libres et liées (Monnier *et al.*, 1962).

Stabilité structurale : indice log 10 I_S de Hénin et Monnier (1956).

pH

P_2O_5 assimilable (Dyer)

K_2O échangeable

MgO échangeable.

3.2. *Analyses de feuilles* : poids moyen de la matière sèche des feuilles, teneurs de la matière sèche en N, P. K. Ca, Mg totaux.

3.3. *Comptage des racines* visibles sur une tranchée de 2 m de long, perpendiculaire aux lignes d'arbres.

3.4. *Rendement* : pesée totale des fruits de chaque parcelle.

Avant l'installation de l'essai, les longueurs de circonférence des troncs et les rendements ont été notés pour être utilisés éventuellement comme covariables. L'écart extrême entre traitements « entretien du sol » atteignait 3,3 p. 100 de la moyenne pour la circonférence et 22 p. 100 pour les rendements.

L'écart extrême entre traitements « entretien » de l'indice log 10 I_S atteignait 3,8 p. 100 de la moyenne.

Résultats et discussion

Les divers résultats seront discutés à la suite de leur présentation. Nous reprendrons ensuite certains points de cette discussion en les complétant lors de l'interprétation des variations de rendement.

1. — *Influence des traitements sur le sol*

On n'a effectué de mesures systématiques que certaines années. On donnera donc pour chaque paramètre l'essentiel des résultats et leur évolution dans le temps.

Pour faciliter la présentation, on utilisera les abréviations suivantes en plus de celles déjà données pour les traitements principaux et secondaires :

— Situation des prélèvements :

A : sous la rangée d'arbres,

I : au centre de l'interligne,

R : sous le passage des roues.

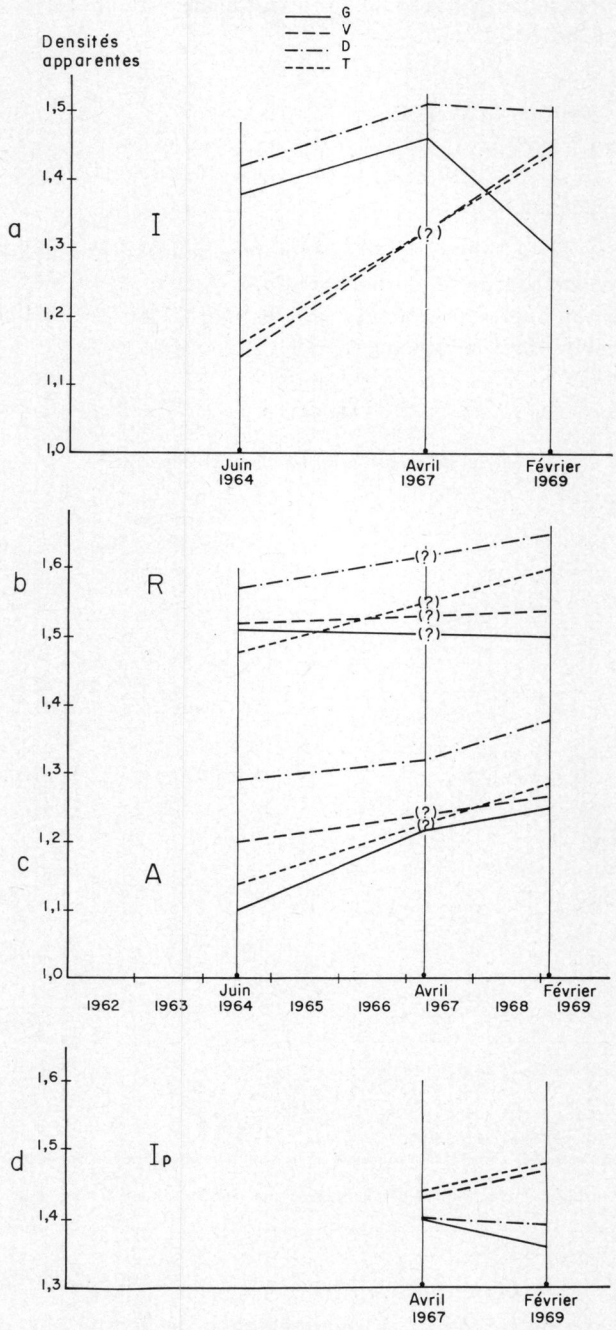


FIG. 1. — *Densités apparentes.*

G : gazon ; D : désherbant ; V : engrais vert ; T : témoin.
Surface *a*) centre de l'interligne (I), *b*) sous le passage des roues (R), *c*) sous les arbres (A).
Profondeur *d*) centre de l'interligne : I_P.

Sans indice, ces lettres correspondent à la couche 0-10 cm ; avec l'indice p (profondeur) à la couche 10-20 cm.

— Cotes :

Z_1 : 0 à 9-10 cm,

Z_2 : 10-12 à 20 cm.

1.1. *Densité apparente.*

Elle a été mesurée à 3 dates, la deuxième série de mesures n'ayant concerné que le groupe non travail (gazon G, désherbant D).

Les valeurs obtenues sont données par la figure 1 et les résultats de l'analyse statistique rassemblés dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Analyse statistique pour les densités apparentes

Dates		Juin 1964	Avril 1967 (de Flaujac, 1967)	Février 1969 (Pouly, 1969)
Modes: entretien	z_1	D vs (G, T, V) *** (1) G vs (T, V) * T vs V	D vs G * (2)	(D vs G, T, V) *** (G vs T, V) ** T vs V
	z_2	—	en I : (D, G) vs (T, V)	en I : (D, G) vs (T, V) ***
Situation		R vs (A, I) *** A vs I ***	A vs I *	R vs (A, I) *** A vs I ***
Cote		—	z_1 vs z_2	—
Mode entretien × situation		entretien × situation (D vs G, T, V) × (R vs A, I)* (G vs T, V) × (A vs I) ***	(D vs G) × (A vs I)	pour z_1 (3) : entretien × situation
Mode entretien × cote		—	(D vs G) × (z_1 vs z_2)	entretien × cote *
Situation × cote		—	(A vs I) × (z_1 vs z_2) *	—

(1) Conventions pour les seuils de significations :
5 p. 100 = *
1 p. 100 = **
0,1 p. 100 = ***
absence d'indication, seuil supérieur à 5 p. 100.

(2) Double split plot pour GD : traitement subdivisé en ligne et interligne, chacun de ces derniers étant subdivisé en z_1 et z_2.

(3) L'interaction entretien × cote étant significative, on a analysé séparément surface et profondeur.

Pour la couche de surface, les principaux traits de l'évolution dans le temps sont :

— Pour le groupe travail (T, V) augmentation de densité plus accentuée dans l'interligne (I) que sous les arbres (A). Cette évolution ne traduit pas forcément un effet à long terme, les mesures de 1964 ayant été réalisées en juin après un travail du sol et celles de 1969 en février après la dégradation de la structure consécutive aux précipitations hivernales.

— Sous gazon, les évolutions sont différentes suivant la situation : invariance sous le passage des roues ; sous les arbres, augmentation lente qui ne paraît pas terminée en 1969 ; au centre de l'interligne, passage par un maximum (1,46 en 1967), puis diminution. Il est vraisemblable que la préparation de terre fine pour le lit de semence du gazon aurait facilité la dégradation avant que l'action améliorante de la végétation soit appréciable.

— Avec désherbant, la densité semble atteindre une limite (1,50) à partir de 1967 environ au centre de l'interligne ; elle continue à augmenter sous les arbres, la valeur atteinte en 1969 (1,38) étant de beaucoup inférieure à la valeur à l'équilibre précédente.

— Pour les deux séries de mesures complètes (1964 et 1969), en ne distinguant pas la situation des prélèvements (A, I, R), le critère « absence totale de végétation » opposant le désherbant (D) aux autres traitements (G, T, V) est le meilleur ; le gazon est distinct du groupe non travail (T, V) lui-même homogène. Les densités apparentes se rangent ainsi par valeurs décroissantes : désherbant, (témoin, engrais vert), gazon.

La série incomplète de mesures de 1967 donne des résultats cohérents avec les précédents : D > G.

La position dans l'interligne intervient, les densités s'ordonnant ainsi par valeur décroissante : passage de roues (R), centre de l'interligne (I), sous les arbres (A). Trois zones existent en effet : *sous les arbres* aucun passage d'hommes ni d'engins, peu ou pas de travail du sol, pas ou peu de végétation spontanée ou semée, action protectrice de la couronne des arbres. *Au milieu de l'interligne*, circulation des hommes, possibilité de travail du sol, pas d'action protectrice des arbres. *Sous le passage des roues*, le tassement par les véhicules intervient de façon prépondérante en plus des actions précédentes.

Les modes d'entretien ne modifient pas fondamentalement les différences de densités liées à la situation dans l'interligne.

L'interaction mode d'entretien-situation n'est significative qu'au début de l'essai (1964) ; elle traduit deux effets : par rapport aux autres modes d'entretien (G, T, V), le désherbant (D) tasse relativement plus le sol hors du passage des roues (A, I) que sous celui-ci (R) ; par rapport au groupe travail du sol (T, V), le gazon (G) provoque paradoxalement au début un tassement plus important au centre de l'interligne (I).

Dans la couche sous-jacente, les évolutions sont tout à fait différentes. C'est le critère « travail du sol » qui est le meilleur : l'opposition « travail » (T : 1,44 ; V : 1,43) « non travail » (D : 1,40 ; G : 1,40) se dessine en 1967 et devient très significative en 1969.

Au cours du temps, la densité croît pour le groupe « travail » et diminue pour le groupe « non travail ». Cette évolution, différente de celle constatée pour la couche superficielle (d'où l'interaction entretien × cote de 1969), s'explique ainsi :

La couche de sol placée en-dessous de la limite de travail n'est pas améliorée par celui-ci, mais subit le tassement consécutif au passage des outils. Sans travail du sol, la compacité tend à diminuer, à vrai dire un peu plus rapidement sous gazon (1,36) que sous désherbant (1,39). Ces effets étaient apparus 7 ans au plus après l'installation de l'essai.

L'interaction situation × cote, signalée en 1967 pour D et G, traduit le fait que pour l'ensemble des traitements, la densité en surface est plus basse sur la ligne d'arbres

(1,26) que dans l'interligne (1,48), les valeurs étant analogues en profondeur (1,48 sur la ligne et 1,41 sur l'interligne).

1.2. *Porosité à l'air* (fig. 2).

Il s'agit de la fraction de porosité occupée par l'air lorsque le sol est à la capacité au champ. Ce paramètre varie parallèlement à la densité apparente, mais à cause de l'augmentation de dispersion due au calcul de cette valeur à partir de deux autres (densité apparente, capacité au champ), les différences ne sont pas toujours significatives :

En surface.

— En 1967 (de Flaujac ,1967) :

G vs D *

(G vs D) × (A vs I) **

(A vs I) × (Z_1 vs Z_2) *.

La porosité à l'air est plus élevée sous gazon qu'avec désherbant, sous les arbres seulement (d'où l'interaction).

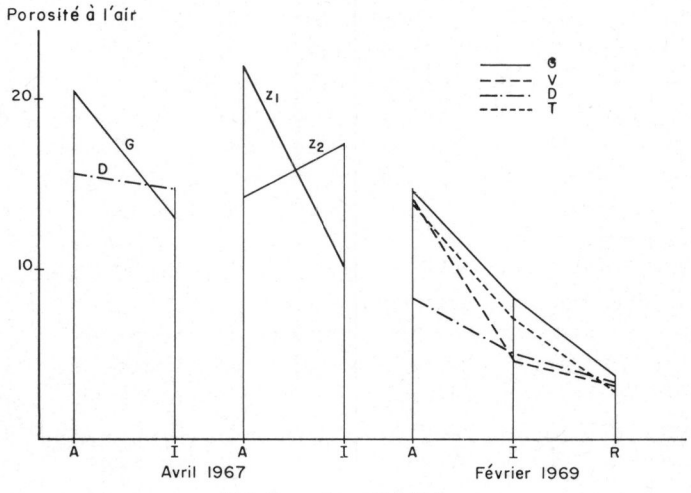


FIG. 2. — *Porosité à l'air.*

— En 1969 : seule la situation a des effets significatifs :

R vs (A-I) ***, A vs I *** ; en effet, les différences de moyennes ne sont appréciables qu'en A (fig. 2).

La diminution de porosité à l'air de 1967 à 1969 est plus marquée pour D que pour G : les valeurs en 1967 étant 100, en 1969 pour A : G = 61, D = 41 ; pour I : G = 72, D = 41. Ces variations ne peuvent s'expliquer par la seule augmentation de densité apparente (variation relative de 3 p. 100) ; les différences d'évaluation de la capacité au champ d'une année à l'autre sont certainement en cause.

En profondeur.

Aucune différence entre les 4 traitements en 1967. En 1969, la porosité du groupe non travail est supérieure à celle du groupe travail **.

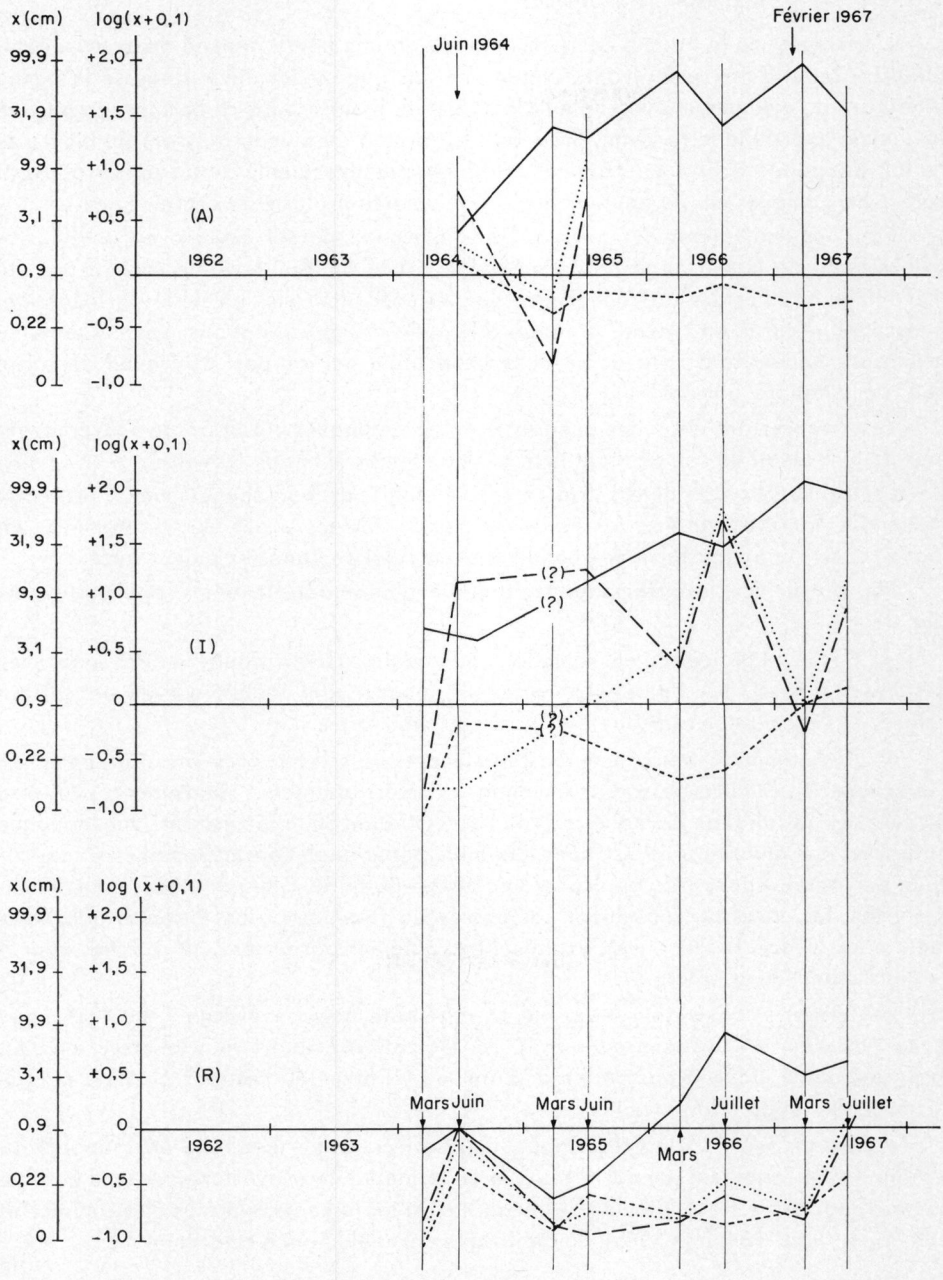


FIG. 3. — *Indice de percolation de Muntz.*

X : hauteur (cm) de la lame d'eau infiltrée en une heure.

G
V
D
T

1.3. *Indice de perméabilité de Muntz.*

L'épaisseur de la lame d'eau (cm) infiltrée en une heure dépend de la perméabilité du sol, de la forme du front humide une fois que ce dernier a dépassé la partie inférieure du cylindre et du gradient de potentiel. Il entre dans ce dernier, en plus de la charge hydraulique (gravité, pression), la succion au niveau du front humide ; de ce fait l'humidité du sol au moment de la mesure intervient, cette succion pouvant varier de quelques cm de hauteur d'eau équivalente à plusieurs centaines de cm.

Pour les traitements comportant l'été un travail du sol, celui-ci est un élément déterminant de la variation de perméabilité : à la fin de l'hiver le sol n'a pas été travaillé et sa structure a été dégradée par les précipitations ; en été la perméabilité, quasi infinie après un travail, diminue à la suite des précipitations. Les résultats de la mesure dépendront donc de sa date d'exécution par rapport au travail du sol et des précipitations qui ont suivi celui-ci.

Les mesures ont été faites pendant 4 ans à 2 époques : à la fin de l'hiver avant le premier travail du sol, pendant l'été quelque temps après un travail.

Les variances des divers traitements n'étant pas homogènes, mais liées aux moyennes correspondantes, les hauteurs d'eau infiltrées x ont été transformées en log $(x + 0{,}1)$ pour satisfaire aux conditions d'emploi de l'analyse de variance.

Pour la surface, les principaux traits de l'évolution dans le temps sont les suivants (fig. 3) :

— *Gazon* : l'indice de percolation augmente assez régulièrement pour les 3 situations (A, I, R), l'amélioration en R apparaissant toutefois avec un certain retard. Les fluctuations saisonnières sont peu marquées.

— *Désherbant* : l'indice, très bas, varie peu sous les arbres (A). Au centre de l'interligne (I), l'indice passe par un minimum, puis augmente légèrement, peut-être à cause de l'installation de mousses et de l'accentuation de la fissuration. Une tendance analogue se manifeste sous les roues. La faible percolation constatée doit être rapprochée des observations micromorphologiques de Bulfin et Gleeson (1967) : en sol nu désherbé, les pores ne constituent pas un réseau régulier et sont orientés parallèlement à la surface, tandis que pour un sol travaillé, les pores fins sont ramifiés et présentent toutes les orientations.

— *Témoin* : l'opposition hiver-été se manifeste assez nettement : en 1964 pour R, en 1965 pour A (pas de mesure en I), en 1966 et 1967 pour I (pas de mesure en A), la perméabilité étant la plus faible à la sortie de l'hiver. Il n'est pas possible de discerner d'évolution à long terme.

— *Engrais vert* : les améliorations temporaires de perméabilité par rapport au témoin sont étroitement liées à la réussite de la plante de couverture qui sera enfouie comme engrais vert ; l'indice de perméabilité est alors beaucoup plus élevé que celui du témoin (juin 1964, juin 1965). Sinon il varie parallèlement à ce dernier.

L'interprétation des analyses statistiques (tabl. 2) découle des considérations ci-dessus.

En fin d'hiver, avant le premier travail du sol, seul le gazon (G) se distingue des autres traitements (D, T, V), dont l'indice de percolation est faible. A cette époque, la présence de la plante de couverture (même si elle a bien poussé) ne provoque pas d'amélioration. Cela tiendrait à la confection de terre fine pour le semis à l'automne

TABLEAU 2

Analyse statistique pour les indices de perméabilité. Parcelles à dose double d'azote en général

	Modes d'entretien	Situation	Interaction entretien × situation	Azote
1964				
Mars (1)	G vs (D, T, V) * D vs (T, V) T vs V	R vs I *	(G vs D, T, V) × (R vs I) *	?
Juin	(G, D) vs (T, V) *** (G, V) vs (D, T) *** travail × végétation	R vs (A, I) *** A vs I	(G, D vs T, V) × (R vs A, I) * (G, D vs T, V) × (A vs I) *	?
1965				
Mars	G vs (D, T, V) *** D vs (T, V) T vs V	R vs I ***	(G vs D, T, V) × (R vs I) **	?
Juin	D vs (G, T, V) *** (2) G vs (T, V) T vs V	R vs (A, I) *** A vs I	(D vs G, T, V) × (R vs I) ***	?
1966				
Mars	en I : (N_1 et N_2) : G vs (D, T, V) *** D vs T, V * T vs V *		?	NS
	en R : (N_1 et N_2) : G vs D, T, V *** D vs T, V T vs V		?	NS
Juillet	en I : (N_1 et N_2) : D vs G, T, V *** G vs V, T T vs V		?	NS
	en R : (N_1 et N_2) : G vs D, T, V *** D vs T, V T vs V		?	NS
1967				
Mars	(3) G vs (D, T, V) ** D vs T, V T vs V	R vs I *	(G vs D, T, V) × (R vs I)	NS
Juillet	(3) G vs (D, T, V) ** D vs T, V * T vs V	R vs I ***	(G vs D, T, V) × (R vs I)	en I : * (4)

(I) Pas de mesure en A.
(2) (G-D) vs (TV) *.
(GD)vs (DT) **.
travail × végétation ***.
(3) Analyse sur parcelle N_2.
(4) Analyse sur parcelle N_1 N_2 en I.

(« glaçage » plus facile que pour une terre en mottes), à la brièveté du repos sous végétation, enfin à la diminution temporaire de perméabilité consécutive à la phase d'installation d'une végétation herbacée, effet constaté par Frith (1952) en verger et Barley (1954) au laboratoire. Barley et Sedgley (1958) expliquent ce phénomène par le remplissage d'une partie des pores par les radicelles.

En été, on distingue deux cas selon que le ray-grass enfoui comme engrais vert a bien poussé ou non :

a) *Réussite de l'engrais vert* : l'action des modes d'entretien s'interprète comme la somme des effets du « travail du sol » (G, D vs T, V) et de la « végétation installée » (G, V vs D, T), l'interaction travail × végétation n'étant pas significative (été 1964). En 1965, comme elle était significative, on a adopté la comparaison D vs G, T, V conformément aux conventions précédentes.

L'augmentation de perméabilité consécutive à l'enfouissement de l'engrais vert (2 à 3 fois celle du témoin travaillé aux mêmes dates) proviendrait non seulement d'une meilleure stabilité effectivement constatée, mais aussi de la présence de débris végétaux limitant l'évolution vers une structure continue. L'examen des courbes cumulées d'infiltration Muntz (fig. 4) tendrait à montrer que, pendant la mesure, la structure

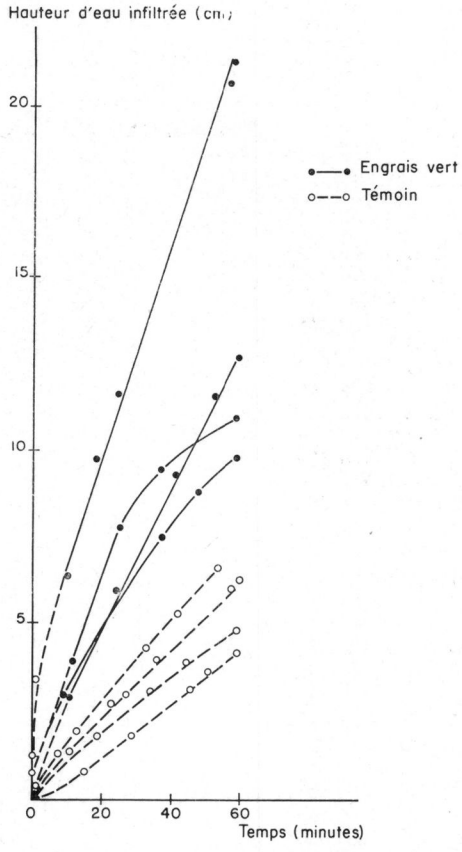


FIG. 4. — *Courbes d'infiltration des tests de percolation de Muntz.*

ne change pas dans le témoin, qui aurait atteint sa « valeur plancher » de tassement, alors qu'elle se dégrade sous l'engrais vert, qui aurait conservé une partie de l'amélioration provoquée par le travail.

b) *Echec de l'engrais vert* : le travail du sol améliorant la perméabilité de la même façon pour le témoin et l'engrais vert, ces deux traitements forment avec le gazon un

groupe homogène, d'où l'opposition D vs G, T, V. Cependant, l'été 1967, l'amélioration du gazon s'accentuant au cours du temps, on a la comparaison G vs D, T, V, le groupe D, T, V n'étant pas homogène.

La perméabilité dans le passage des roues est beaucoup plus faible que dans les autres situations.

Les interactions entretien × situation n'apparaissent qu'en début d'essai :

— effet améliorant du gazon seulement dans l'interligne (mars 1964 et 1965) ;

— action plus intense du travail du sol hors des roues (juin 1964) et au centre (juin 1964). Cette dernière constatation s'explique par les difficultés de travail du sol sous la frondaison des arbres, difficultés qui augmentent avec le développement des arbres ;

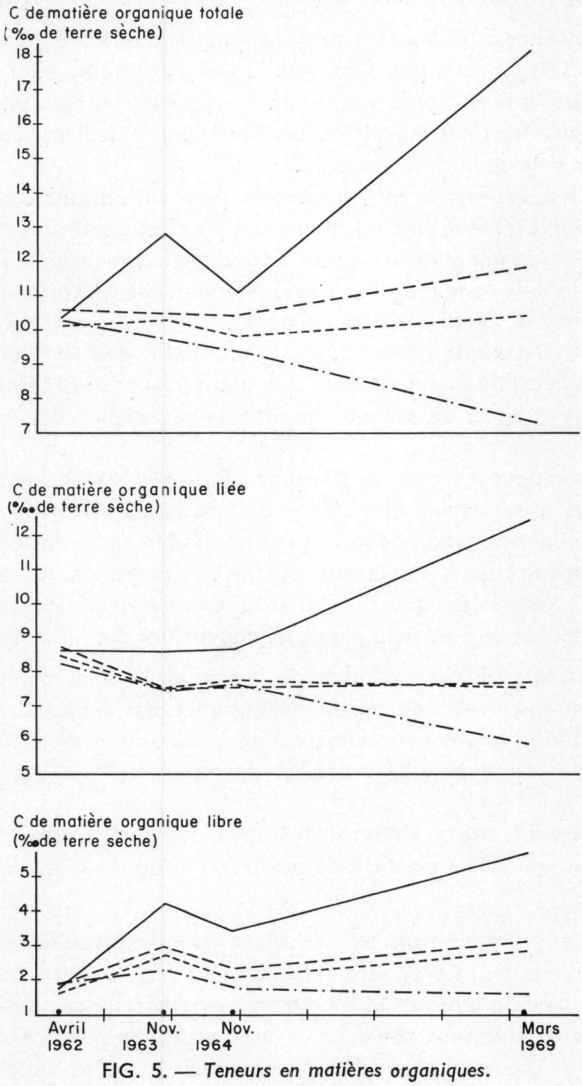


FIG. 5. — *Teneurs en matières organiques.*

— indices de perméabilité à peu près égaux dans le passage des roues seulement en juin 1965.

L'effet de la fumure azotée analysé en 1966 et 1967 est significatif * seulement en juillet de cette dernière année.

En profondeur, aucune différence de l'indice de perméabilité n'a été constatée 3 ans après l'installation de l'essai.

1.4. *Matières organiques et stabilité structurale.*

La stabilité structurale étant sous la dépendance étroite des matières organiques, nous examinerons ensemble les effets des traitements sur ces deux paramètres.

Matières organiques : les doses d'azote appliqué n'interviennent pas significativement, quoique GN_2 soit un peu supérieur à GN_1, du moins pour le carbone de la fraction libre. Aussi a-t-on représenté sur la figure 5 les teneurs en carbone total et celles des fractions libre et liée (fraction humifiée), calculées en considérant la moyenne relative aux deux doses d'azote.

L'interprétation des variations est délicate pour un ensemble de raisons : dans le cas du gazon, enlèvement plus ou moins complet des parties aériennes, épaisseur de sol prélevé ; pour le témoin et l'engrais vert, variations accidentelles de profondeur de travail remontant de la terre plus organique que celle de surface en début d'essai (respectivement 10,7 et 7,8 p. 1 000 de carbone).

Dans les parcelles « non travail », il est indubitable que les matières organiques (totales, libres ou liées) augmentent pour G et diminuent pour D ; dans ce dernier cas, l'absence de végétation et de travail simplifie le problème des prélèvement des échantillons.

Pour les traitements « travail », l'origine de la très légère augmentation à long terme est difficile à expliquer, le matériel de travail du sol ayant changé en cours d'essai à cause de la diminution de la largeur accessible entre les arbres. Monnier et Gras (1965) ont montré qu'il y avait par contre une augmentation temporaire significative (* et *** selon les époques) du taux de carbone organique à la suite de l'enfouissement des herbes de T et de la plante de couverture de V (fig. 6).

Stabilité structurale : Elle a été suivie au moyen de l'indice log 10 I_S (Hénin *et al.*, 1958) qui varie en sens inverse de la stabilité. Les effets des modes d'entretien se superposent aux variations saisonnières de stabilité : maximum d'été, minimum d'hiver apparaissant à des époques différentes suivant la répartition des pluies (Monnier, 1965).

Indiquons d'abord que ni l'effet des doses d'azote, ni l'interaction entretien $\times$ azote, n'ont été significatifs, aussi a-t-on porté sur la figure 7 les moyennes des traitements N_1 et N_2.

Le gazon a l'effet améliorant le plus élevé, significativement différent de celui des autres traitements dès la première année de l'essai. Cet effet croît moins que proportionnellement avec le temps. On a constaté certaines années une légère influence de la dose double d'azote sans que celle-ci soit significative. Variations des minimums d'hiver de log 10 I_S (de novembre 1963 à mars 1969) : — 0,60. La diminution de l'indice I_S résulte de variations de ses composantes : par exemple, en fin d'essai, par rapport au témoin pris égal à 100 : fraction 0-20 μ dispersée : — 13 p. 100 ; agrégats

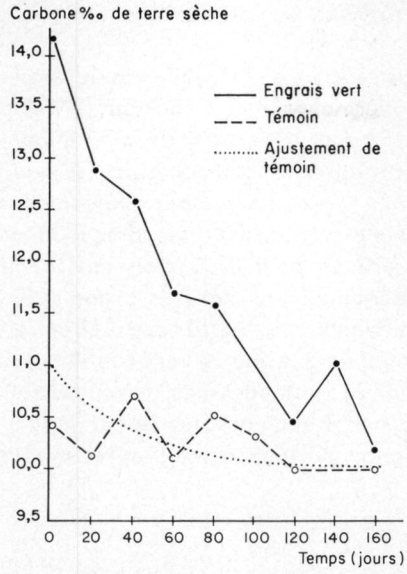


FIG. 6. — *Evolution du taux de carbone organique des parcelles témoins et engrais vert.*

L'engrais vert et la végétation spontanée du témoin ont été enfouis à la même date prise pour instant zéro. L'équation de la courbe d'ajustement du témoin est

$$y = 10 + 1{,}49 \exp(-0{,}024\,8\ t),\ t \text{ en jours.}$$

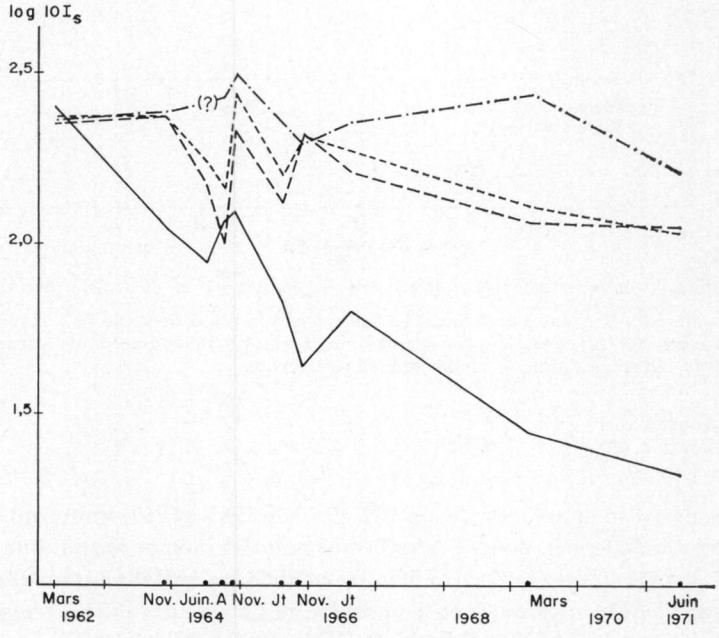


FIG. 7. — *Instabilité structurale : indice* log 10 I_S.

G
V
D
T

stables « alcool » : + 5 p. 100 ; agrégats « air » : + 620 p. 100 ; agrégats « benzène » : + 820 p. 100.

Cette amélioration appréciable de la stabilité est la conséquence d'une augmentation considérable de la matière organique : en 7 ans, + 145 p. 100 pour le carbone de la fraction liée, + 326 p. 100 pour le carbone de la fraction libre. L'amélioration de stabilité qui apparaît 8 mois après le semis du gazon se poursuit encore 7 ans après.

La stabilité avec *engrais vert* augmente périodiquement chaque année à la suite de son enfouissement. Cet effet améliorant cesse lorsque la totalité de la matière organique a disparu, c'est-à-dire au bout de 5 mois environ (Monnier et Gras, 1965) (fig. 8). Les légères augmentations de matières organiques et de stabilité constatées la 7e année, ainsi que la diminution de log 10 I_S de 0,28 entre 1963 et 1969, ne peuvent être attribuées à une action à long terme de l'engrais vert, compte tenu des influences parasites de la variation de la profondeur de travail du sol et des restitutions croissantes par les feuilles d'arbre. Rappelons que Baker (1937) et Proebsting (1952) ne signalent pas d'augmentation du taux d'azote après des périodes de 10 et 20 ans d'engrais vert d'hiver.

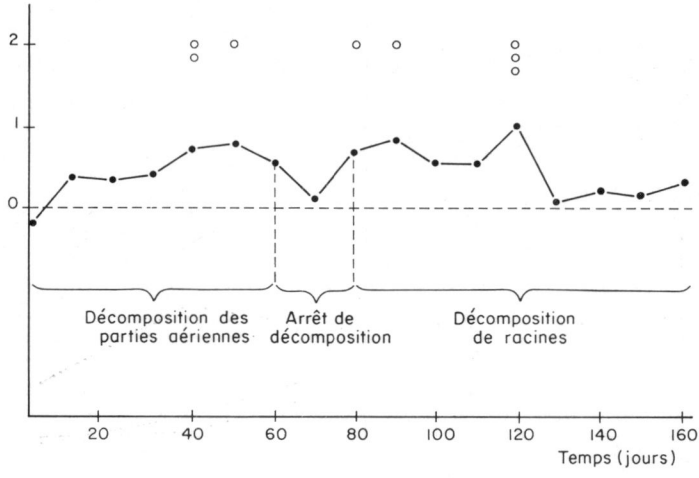


FIG. 8. — *Différences entre les agrégats vrais benzène de l'engrais vert et du témoin* (pris égal à zéro).

Les agrégats vrais benzène s'obtiennent en retranchant le poids de sable de l'agrégat du poids total des agrégats stables après le prétraitement benzène. Ce taux d'agrégats caractérise l'effet améliorant de la matière organique sur la stabilité structurale.

——— Engrais vert
------ Témoin

O 5 p. 100 ; O 1 p. 100 ; O 0,1 p. 100

Pour le *témoin*, la diminution de log 10 I_S (0,26 de 1963 à 1969) traduirait une légère amélioration à long terme, difficile à confirmer pour les mêmes raisons que pour l'engrais vert. Cependant, à la suite de l'enfouissement de la végétation spontanée d'hiver, on constate une légère augmentation temporaire de stabilité parallèle à l'augmentation du taux de carbone. L'enherbement spontané d'hiver se comporte comme un engrais vert à effet atténué.

Le désherbant atteint le maximum de dégradation en 1964 (indice de 2,43), puis présente une très légère amélioration explicable peut-être par l'installation de mousses

à la surface du sol ou par des restitutions accidentelles de matière organique par apport trop tardif de désherbant.

En définitive, la stabilité est sensiblement la même 7 ans après l'installation de l'essai, la variation de l'indice étant quasi nulle (+ 0,02) de novembre 1963 à mars 1969). Cependant, le carbone de la matière organique liée a diminué de 20 p. 100 et celui de la matière organique libre de 16 p. 100 ; il n'y a donc pas de parallélisme étroit entre les évolutions de la stabilité et celles de la matière organique.

1.5. *Etat chimique du sol.*

Les premières années, on n'avait pas enregistré d'influence des divers traitements sur la teneur des sols en éléments assimilables. Vers la fin de l'essai (septembre 1972, contrôle uniquement sur les parcelles N_2), c'est en D que la teneur en acide phosphorique assimilable était la plus élevée, en surface comme en profondeur, alors que la teneur en potasse échangeable était la plus faible en G (tabl. 3). Les teneurs en Mg échangeable et les pH (de l'ordre de 6) ne se différenciaient pas significativement.

TABLEAU 3

Teneur du sol en éléments fertilisants en 1972 (*Parcelles* N_2)

	P_2O_5 p. 1 000 (1)		K_2O p. 1 000 (2)		Mg O p. 1 000 (2)	
	0-10 cm	18-25 cm	0-10 cm	18-25 cm	0-10 cm	18-25 cm
D	0,21 a	0,19 a	0,25 a	0,27 a	0,17 a	0,17 a
G	0,13 b	0,13 b	0,20 b	0,20 a	0,15 a	0,14 a
T	0,16 b	0,16 b	0,23 ab	0,30 a	0,15 a	0,17 a

Par colonne, différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes.
(1) Dyer.
(2) Echangeable.

L'interprétation de ces variations doit tenir compte des réserves formulées précédemment pour la matière organique.

En fin d'essai, la teneur en P assimilable plus élevée dans les parcelles désherbées que dans les témoins s'explique peut-être par un passage de P organique à P minéral, lié à la baisse notable du taux de matières organiques (on peut admettre qu'à une teneur en matières organiques de 10 p. 1 000 correspond une teneur en P_2O_5 organique de l'ordre de 0,12 p. 1 000). Des observations dans le même sens ont été effectuées également ailleurs (Shankar et Kumar, 1969 ; Belobrov, 1972). Inversement, sous gazon, la teneur plus basse pourrait correspondre à une immobilisation de P sous forme organique et aux prélèvements correspondant à une croissance plus forte.

En 1972, les valeurs obtenues en surface sont inférieures à celles du début (qui étaient de l'ordre de 0,30 p. 1 000 P_2O_5 citrique) et apparaissent comme un peu faibles. De fait, aucune fumure phosphatés n'a été appliquée au cours de l'essai.

Sous gazon, la teneur en K échangeable est inférieure à celle des autres traitements, ce qui n'a pas toujours été observé dans d'autres essais (Chevalier, 1965 ; Redlich, 1965 ; Bould *et al.*, 1972) et reste plus difficile à interpréter en l'absence de

prélèvements permettant de suivre les variations éventuelles en cours d'année, le gazon étant exigeant mais recyclant le potassium absorbé. Quoi qu'il en soit, la teneur en K_2O échangeable est devenue elle aussi partout plus faible en surface (valeur initiale 0,30 p. 1000), mais plus élevée en profondeur (valeur initiale 0,14 p. 1000), sans doute à la suite des applications avec des appareils localisateurs. Les teneurs sont donc partout moyennes, mais la répartition de l'enrichissement du sous-sol est hétérogène et les analyses rendent mal compte des conditions réelles d'alimentation.

Une baisse de pH supérieure à 1 unité avec la dose double d'azote a été observée de façon identique sur l'ensemble des modes d'entretien, sans doute en relation avec la fumure azotée en partie ammoniacale supérieure aux prélèvements.

2. — *Biologie du sol*

2.1. *Microflore.*

Les études sur la microflore (Simon-Sylvestre, 1974) n'ont porté que sur les comparaisons dans l'espace entre témoin et désherbant après 9 applications annuelles d'atrazine, pour la flore totale et quelques groupes microbiens. Les techniques de détermination sont des techniques classiques décrites antérieurement (Simon-Sylvestre, 1967).

Les résultats concernent uniquement la couche 0-5 cm, les couches plus profondes ne se différenciant pas significativement. La microflore totale des parcelles D est très nettement inférieure en nombre à celles des parcelles T, de même que les champignons (tabl. 4).

TABLEAU 4

Influence du désherbant sur la microflore du sol (couche 0-5 cm après 9 années d'application, en indices de comparaison par rapport au témoin = 100)

	1 mois	4 mois	9 mois	21 mois
	après le dernier traitement			
Microflore totale	15,6	58,7	18,4	12,3
Champignons	24,1	78,5	60,5	68,4

Par contre, on n'enregistre guère d'effet sur le nombre d'azotobacters ni sur celui des bactéries cellulolytiques aérobies (cependant, modification probable des espèces pour ces dernières).

Dans un essai à long terme, l'action du désherbant sur la microflore tient aussi bien à l'effet propre de celui-ci (qui pourrait être stimulant ou dépressif selon les espèces microbiennes considérées) qu'aux modifications des conditions de milieu (baisse du taux de matières organiques notamment). Quoi qu'il en soit, l'action du désherbant ne s'est fait sentir dans le cas présent que dans les couches très superficielles et en définitive, malgré l'importante diminution de la flore totale, il n'est pas apparu de conséquences défavorables sur les conditions de fonctionnement et d'alimentation du système racinaire, compte tenu des fumures minérales régulièrement appliquées.

2.2. *Vers de terre.*

On a pris comme indice de leur nombre, et vraisemblablement aussi de leur activité, la présence de galeries de vers dans les prélèvements de même volume effectués en vue des mesures de densité. A cet effet, on a classé les prélèvements en deux catégories : avec au moins une galerie (+), sans galerie (0).

Les résultats ont été traités en tables de contingences, croisant les catégories de prélèvement (+, 0) et les modalités de la variable étudiée ; le seuil de signification est celui du test χ^2.

Prélèvements d'avril 1967 (p. 100 de +) :

0-10 cm, regroupement A et I : G = 60, D = 20, seuil 10 p. 100,

10-20 cm, regroupement A et I : G = 100, D = 25 **,

10-20 cm, position I : G = 100, V = 57, D = 20, T = 13 *.

Prélèvements de février 1969 : Regroupement A — I — R — I_P : G = 90 ; V = 40 ; D = 20 ; T = 48 ***.

Pour le traitement G : A = 100, I = 100, R = 50, I_P = 100 ***.

Pour le traitement D : A = 50, I = 0, R = 0, I_P = 25, seuil supérieur à 10 p. 100.

On trouve donc plus de trous de vers dans le gazon et moins sous le passage des roues.

Les vers sont certainement plus nombreux sous gazon que dans le témoin, car l'augmentation du nombre de galeries ne peut pas s'expliquer entièrement par une activité plus intense ; Van Rhee et Nathans (1961) signalent un nombre triple de celui du sol nu. Par contre, le nombre est minimum sous désherbant. Ces différences de comportement s'expliquent en grande partie par la disparité de fourniture de matière végétale fraîche. Dans le cas du désherbant, on peut faire aussi intervenir des effets de compacité et une éventuelle toxicité des herbicides. Enfin, le tassement par les roues ne facilite pas le creusement des galeries.

2.3. *Nématodes.*

Scotto La Massese en 1971 a constaté une augmentation du nombre de nématodes sous gazon par rapport au groupe témoin-engrais vert-désherbant, la population de nématodes étant plus de quatre fois plus importante que dans le témoin : les *Paratylenchus* y étaient abondants ainsi que les endoparasites des racines, notamment *Pratylenchus penetrans*. Marks *et al.* (1973) signalent aussi une prolifération de ce nématode sous enherbement.

La diminution du nombre d'espèces dans les parcelles désherbées, avec augmentation de la proportion de *Paratylenchus*, serait due à un effet indirect consécutif à l'élimination des plantes-hôtes. Frey (1973) a fait des constatations un peu différentes pour des sols désherbés avec simazine ou diuron : diminution du nombre total et notamment de *Paratylenchus*.

Le fait qu'il n'y a pas plus de *Paratylenchus* sous engrais vert que dans le témoin doit s'interpréter en remarquant que le ray-grass n'est pas un bon hôte pour ce nématode.

3. — *Influences sur les arbres*

Nous allons présenter les différents résultats avant de les interpréter.

3.1. *Racines* (été 1965).

Le travail du sol (V — T) induit sur les 25 premiers cm une répartition croissante des racines en fonction de la profondeur et correspond au nombre total de racines le plus élevé (fig. 9) ; le nombre de racines est inférieur pour le gazon (après transformation log (x + 0,1) : G vs D, T, V *) ; pour G et D, la répartition varie peu avec la profondeur, sauf en surface.

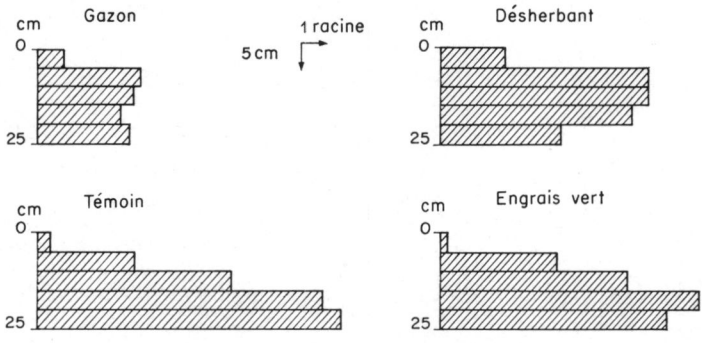


FIG. 9. — *Nombre de racines sur une coupe de sol, large de 200 cm.*

Le nombre de racines est significativement plus élevé avec désherbant dans les couches 0-5 cm (D vs G, T, V *) et 5-10 cm (D vs G, T, V ***) ; des racines parviennent jusqu'à 1,5 cm de la surface.

Les éléments nutritifs qui s'y trouvent seront mieux utilisés, ainsi que les petites précipitations. La meilleure conductivité thermique due à la compacité permet un réchauffement plus précoce au printemps, mais peut donner lieu en région chaude à des températures très élevées (Cockcroft et Hughan, 1964) qui peuvent alors empêcher le développement des racines, d'où une absence de celles-ci en surface, constatée par Kimball *et al.* (1951), Proebsting (1955) en Californie et Frith (1952) en Australie.

La rareté des racines sous gazon constatée également par Pisani (1960), Cockcroft et Hughan (1964) s'expliquerait par le dessèchement rapide de la surface par les racines des plantes herbacées. L'hypothèse d'une influence éventuelle de sécrétions de racines serait à rejeter, la présence d'un nombre normal de racines de pommier (Coker, 1959 ; Kotov, 1964) et de citrus (Frith, 1952) étant observée dans la couche superficielle des gazons.

3.2. *Composition minérale des feuilles.*

On a effectué 2 fois par an (fin juin, mi-septembre) des prélèvements de 12 feuilles par arbre, sur 4 rameaux différents. Dans l'ensemble, les seconds prélèvements de l'année ont permis de confirmer les résultats des premiers, et ce sont uniquement ceux-ci qui sont présentés au tableau 5 (1). Le caractère non constant de la

(1) Des observations relatives aux oligoéléments (Fe, Mn, B) ont été données antérieurement (Trocmé, 1970).

TABLEAU 5

Composition minérale des feuilles homologues (p. 100 de matière sèche) prélèvements de juin, sauf 1962 et 1963, septembre

		1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
N	T	2,36 a	2,55 a	2,76 a	2,50 a	2,58 a	2,45 a	2,61 a	2,73 a	2,57 a	2,93 a
	D	2,37 a	2,50 a	2,81 a	2,68 a	2,63 b	2,52 b	2,83 b	2,85 b	2,84 b	3,03 a
	G	2,40 a	2,44 b	2,52 b	2,60 a	2,50 a	2,57 c	2,56 a	2,87 b	2,77 b	3,02 a
	G 1		2,39 a	2,41 a	2,50 a	2,49 a	2,56 a	2,47 a	2,88 a	2,72 a	3,06 a
	G 2		2,50 b	2,62 b	2,70 b	2,51 a	2,58 a	2,52 a	2,86 a	2,81 b	2,98 a
P	T	0,15 a	0,16 a	0,17 a	0,17 a	0,19 a	0,16 a	0,17 a	0,19 a	0,18 a	0,22 a
	D	0,15 a	0,17 a	0,18 a	0,18 a	0,21 b	0,17 b	0,18 a	0,20 b	0,19 a	0,23 ab
	G	0,15 a	0,17 a	0,19 a(1)	0,18 a	0,19 a	0,18 b	0,17 a	0,21 b	0,19 a	0,25 b
K	T	1,34 a	1,26 ab	1,63 a	1,23 a	1,24 a	0,92 a	0,89 a	0,93 a	1,09 a	1,30 a
	D	1,26 a	1,29 a	1,75 a	1,36 a	1,48 b	1,21 b	1,18 b	1,17 b	1,42 b	1,47 b
	G	1,16 a	1,12 b	1,42 b	1,08 b	1,14 a	1,01 a	1,03 c	1,14 b	1,26 b	1,44 b
Ca	T	1,48 a	1,53 a	1,30 a	1,12 a	1,07 a	0,95 a	0,82 a	1,01 a	1,01 a	0,86 a
	D	1,52 a	1,63 a	1,32 a	1,30 b	1,20 a	1,10 ab	1,10 b	1,04 a	1,10 ab	0,91 a
	G	1,52 a	1,83 b	1,38 a	1,32 b	1,22 a	1,13 b	1,07 b	1,19 b	1,16 b	0,92 a
Mg	T	0,20 a	0,22 a	0,23 a	0,21 a	0,23 a	0,20 a	0,16 a	0,22 a	0,24 a	0,22 a
	D	0,21 a	0,20 a	0,20 b	0,20 a	0,24 a	0,21 a	0,19 a	0,24 a	0,24 a	0,22 a
	G	0,20 a	0,20 a	0,23 a	0,23 a	0,24 a	0,24 b	0,18 a	0,27 b	0,28 b	0,23 a

Pour ne pas trop alourdir la présentation, on n'a donné les résultats que d'un seul des deux prélèvements annuels. Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes.

(1) Significativement inférieur à T en septembre 1964.

signification des résultats selon les années justifie le renouvellement régulier des prélèvements.

Les coefficients de variation sont restés relativement peu élevés par comparaison avec ceux d'autres contrôles. Pour l'ensemble de l'essai, ils sont compris entre les valeurs suivantes :

matière sèche des feuilles :	3,7 et 11,4 p. 100
N	1,5 et 4,7 p. 100
P	3,1 et 7,4 p. 100
K	4,2 et 7,3 p. 100
Ca	5,1 et 10,8 p. 100
Mg	8,1 et 14,7 p. 100

Le poids moyen de la matière sèche des feuilles n'a que rarement varié avec les traitements.

Rappelons les observations effectuées les premières années :

Avec désherbant (D), les feuilles sont un peu plus riches en N, P, K, Ca, un peu plus pauvres en Mg que celles du témoin (T).

Avec gazon (G), les feuilles sont plus pauvres en N, même avec la fumure azotée la plus élevée, plus pauvres en P (septembre 1964) et en K, plus riches en Ca.

L'engrais vert (V) a un peu augmenté les teneurs en P et K, mais abaissé la teneur en N (printemps 1964).

Par la suite, les résultats obtenus avec *désherbant* se sont constamment maintenus dans le même sens, sauf pour Mg dont les teneurs sont également devenues supérieures à celles des autres traitements.

Pour le gazon, l'effet dépressif initial a disparu au bout de quelques années. On a rejoint ou dépassé la teneur en azote du témoin (T) avec la dose double d'azote à partir de 1965, et avec la dose simple à partir de 1966-67 ; les teneurs tendent ensuite à s'égaliser quelle que soit la dose d'azote et sont du même ordre que celles des parcelles désherbées. Les teneurs en P et K ont également dépassé celles du témoin, les teneurs en Ca et Mg étant toujours supérieures.

Après les variations initiales, la composition minérale des feuilles des parcelles *engrais vert* ne s'est pratiquement plus différenciée de celle du témoin.

Les teneurs en K s'étant abaissées à des valeurs plutôt faibles sur l'ensemble des traitements, on a été amené à effectuer périodiquement à partir de 1967 des fumures potassiques en localisation profonde au moyen d'un appareil approprié ; il en est résulté un relèvement progressif, mais assez lent, des taux de K dans les feuilles.

3.3. *Croissance.*

Aussi bien d'après les mesures des diamètres des troncs que d'après la pesée des bois de taille effectuée certaines années, la croissance était initialement plus faible avec engazonnement (G vs D, T, V *), sans action significative des doses d'azote ni interaction azote × mode d'entretien ; les poids des bois de taille étaient cependant plus faibles en N_1 qu'en N_2.

Puis les arbres des parcelles gazon (G) sont devenus très vigoureux, à tel point que l'hiver 1968-69 (soit 6 ans après le début de l'essai), les poids des bois de taille étaient supérieurs au poids moyen de ceux des témoins (T) de 62 p. 100 avec la faible dose d'azote, de 93 p. 100 avec la forte dose.

La croissance des arbres des parcelles désherbées (D), sans atteindre celle de G, a elle aussi fini par dépasser le témoin (poids des bois de taille supérieur de 27 p. 100 à celui du témoin l'hiver 1968-69), sans action significative de la dose d'azote.

V ne s'est pas différencié de T à ce point de vue pendant toute la durée de l'essai.

3.4. *Rendements et qualité* (fig. 10 et 11).

Les coefficients de variation correspondant aux divers modes d'entretien étaient très élevés pour les rendements des arbres jeunes, avant l'installation de l'essai (60 p. 100 en 1962). Ils ont diminué avec l'augmentation des rendements et se sont maintenus entre 15 et 20 p. 100. Pour l'effet de l'azote, ce coefficient, plus faible initialement (36,7 p. 100 en 1962), oscille entre 7 et 20 p. 100.

Les rendements moyens du témoin sont passés progressivement de 4,8 t/ha en 1962, à 48,5 t/ha en 1969. Les rendements ont été exceptionnellement bas en 1968 (35,1 t/ha) pour des raisons inconnues, en 1970 et 1971 à cause de la grêle (37,4 et 32,0 t/ha respectivement).

L'absence d'interaction entretien × azote permet de considérer séparément leurs effets.

Les différences entre modes d'entretien commencent à se manifester en 1964 (fig. 8) : l'engazonnement donne des rendements inférieurs, d'où la permanence du

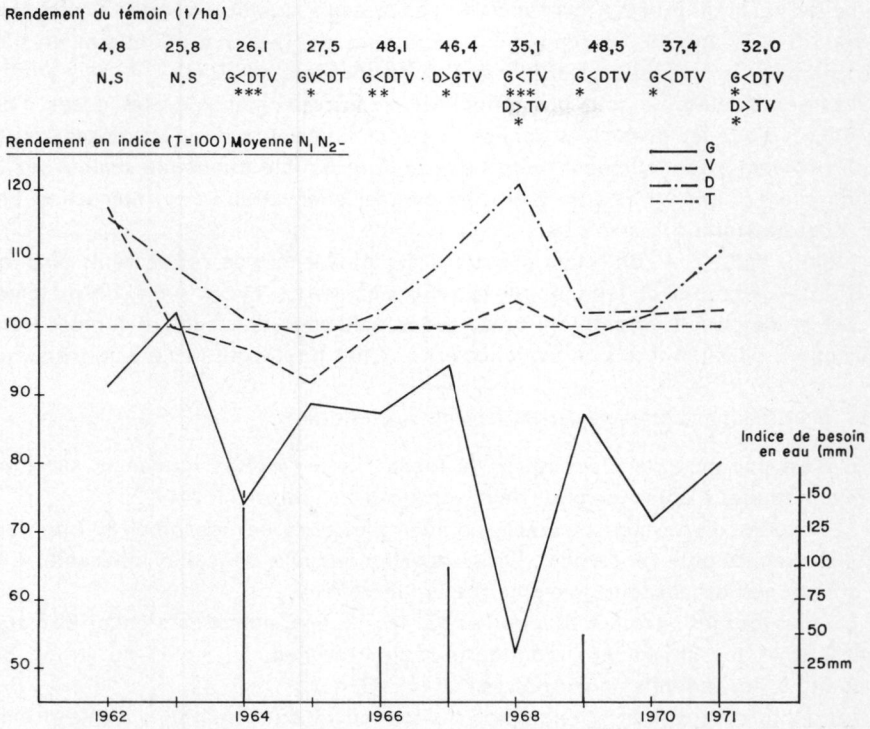


FIG. 10. — *Effets des modes d'entretien sur le rendement et indice de besoins en eau.*

De bas en haut : indice de besoin en eau (mm) ; rendement par rapport au témoin (= 100) ; signification des comparaisons orthogonales ; rendement du témoin.

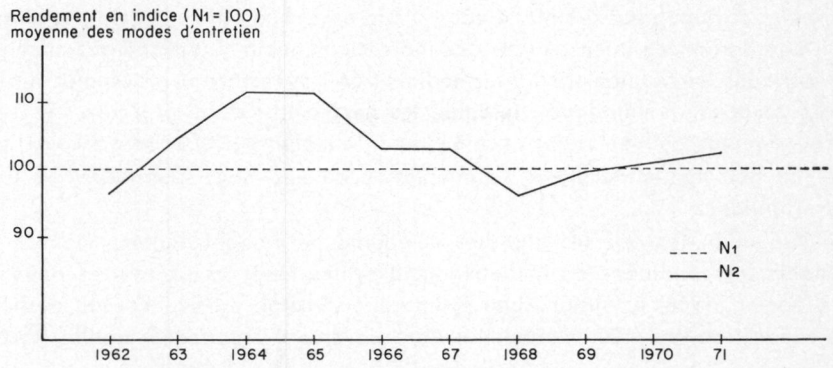


FIG. 11. — *Effet de la fumure azotée sur le rendement.*

classement G < (D, T, V), sauf en 1965. Le rendement exprimé en pourcentage du témoin a été le plus bas en 1968 : 52 p. 100 ; il était de 80 p. 100 en 1971.

Les rendements de l'engrais vert ne diffèrent pas significativement de ceux du témoin, malgré une tendance à des valeurs plus faibles les premières années, celles où a été réussi le semis de ray-grass.

Le désherbant donne 3 fois sur 9 des rendements significativement supérieurs au témoin (10 à 20 p. 100). Le rendement maximum de l'essai a été atteint en 1967 : 54,1 t/ha pour les parcelles désherbées à dose double d'azote.

Les rendements ne sont pas influencés significativement par les doses d'azote (fig. 11), quoique les premières années ils soient supérieurs avec les doses doubles, ce qui provient essentiellement du fait que la dose double a marqué surtout sur l'engazonnement (8 fois sur 9), sans d'ailleurs que cet effet induise une interaction entretien $\times$ azote significative.

Notons enfin que l'entretien provoque des différences de rendements plus fortes (+ 20,7 à — 48 p. 100 du témoin) que la fumure azotée (+ 11,5 à — 4 p. 100 du témoin).

Les études sur la qualité ont porté sur le calibrage des fruits et sur des tests de dégustation. Elles n'ont mis en évidence aucun effet significatif des divers traitements.

3.5. *Interprétation des effets des traitements sur les arbres.*

Il n'est pas possible d'expliquer de façon rigoureuse les influences sur l'arbre des divers modes d'entretien pour deux raisons principales :

Les modes d'entretien peuvent modifier plusieurs des paramètres intervenant sur la croissance et le rendement. On se heurte donc aux difficultés inhérentes à l'action simultanée de plusieurs paramètres sur le végétal.

De plus tous les paramètres modifiés par les modes d'entretien n'ont pu être appréhendés, ainsi que des facteurs comme le régime de l'eau au cours du temps, ou la sensibilité à des maladies parasitaires.

On tentera cependant d'examiner ces influences dans un cadre d'interprétation volontairement simplifié :

— Les modes d'entretien agissent sur l'arbre par l'intermédiaire de sa nutrition minérale et de son alimentation en eau. Ils peuvent modifier dans le sol les *variables de niveau* (par exemple la quantité de phosphore assimilable ou d'eau disponible) et les *variables de flux* (par exemple le débit d'eau absorbée par le végétal). L'alimentation en eau de l'arbre intervient encore indirectement sur le flux de gaz carbonique pénétrant dans les feuilles par l'intermédiaire de l'ouverture des stomates. En outre l'apport de produits chimiques, tels que les herbicides, et la présence des racines d'autres végétaux peuvent avoir éventuellement un effet positif ou négatif sur l'arbre.

— La nutrition minérale et l'alimentation en eau sont soumises à la loi des facteurs limitants.

— On admettra que les analyses de feuille permettent d'interpréter de façon convenable les conditions de la nutrition, avec les réserves présentées antérieurement (Trocmé, 1966) et malgré une éventualité d'action particulière du désherbant sur la répartition des éléments nutritifs dans les divers organes (Schmitlin, 1969).

3.5.1. *Effets sur les variables de flux.*

— *Les flux d'eau et d'éléments nutritifs* pénétrant dans l'arbre dépendent, *lorsque leurs niveaux sont convenables*, du fonctionnement des racines, en relation avec leur aération, elle-même liée à la structure du sol.

Avec désherbant et par rapport au témoin, la dégradation appréciable de la structure de la couche de surface, à vrai dire moins marquée sous les arbres, ne doit pas avoir de conséquences défavorables sur l'aération de l'ensemble des racines. Cette

constatation est en accord avec les résultats de Van Bavel (1951) analysant, à l'aide d'un modèle basé sur la diffusion, l'influence des propriétés physiques de la couche de surface sur l'aération des couches profondes. Si la couche de surface plus tassée est peu épaisse par rapport à l'épaisseur de profil considéré, elle intervient relativement peu sur l'aération des couches profondes. De plus, la couche 10-20 cm s'améliore lentement, comme on l'a vu.

Pour le gazon, il est difficile de dire si l'amélioration de structure, nette par rapport au témoin (et *a fortiori* par rapport au désherbant), a eu des conséquences sur le fonctionnement des racines. En fait, on ne peut évaluer l'importance relative de l'effet favorable de l'amélioration de structure sur l'aération et de l'effet antagoniste de la présence des racines de plantes herbacées, qui occupent une partie de la porosité et surtout augmentent le taux de CO_2 et diminuent le taux d'oxygène.

Avec l'engrais vert, on a aussi des effets de sens opposé : action positive du travail du sol prolongée par les améliorations temporaires de stabilité, action négative de la décomposition de la matière végétale sur la composition de l'atmosphère du sol. On n'a en tout cas pas décelé d'effet net.

3.5.2. *Effets sur les variables de niveau.*

a) *La quantité d'eau disponible pour l'arbre* dépend en première approximation de la contenance du réservoir sol (épaisseur exploitée par les racines), de son remplissage (infiltration de l'eau) et de l'utilisation d'eau par les plantes adventices et associées.

Le *désherbant* diminue notablement la perméabilité, du moins entre les crevasses. Quoique la perméabilité soit très faible, le sol s'humecte assez facilement à cause de la succion ψ qui augmente le gradient de la charge hydraulique. En effet dans le cas d'une lame d'eau affleurant en surface, le gradient hydraulique, quotient de la charge par l'épaisseur de sol est 1 ; pour un sol sec en voie d'humectation, z étant l'épaisseur humectée, ce gradient devient $(z + \psi)/z = 1 + \psi/z$; il est donc supérieur à 1 de la quantité ψ/z qui décroît lorsque l'humectation progresse. Cependant avec $\psi = 100$ cm, ψ/z vaut encore 1 à 1 m, le débit qui est proportionnel au gradient est donc doublé. La présence de crevasses contribue également à une meilleure infiltration de l'eau. En outre l'épaisseur de sol réellement exploitée est plus élevée, les radicelles parvenant jusqu'à 1,5 cm de la surface. Une des conséquences est la meilleure utilisation des petites précipitations. Enfin, la concurrence entre arbres et adventices est quasi nulle.

Dans les conditions du climat de la Brie, la résultante de toutes ces actions est une alimentation hydrique au moins aussi bonne que celle du témoin.

Pour le *témoin* et *l'engrais vert*, l'infiltration est un peu meilleure, mais l'épaisseur exploitée moindre. Le trait essentiel est la présence d'une végétation hivernale qui, enfouie trop tard au printemps, peut certaines années induire un déficit hydrique, surtout pour l'engrais vert. De plus, en été, entre les passages d'outils de travail du sol, la repousse des adventices provoque un gaspillage d'eau.

L'engazonnement a plusieurs effets opposés sur l'eau disponible : l'infiltration de l'eau est plus élevée que pour tous les autres traitements, ce qui n'implique pas forcément un meilleur remplissage du réservoir, l'excédent de la capacité au champ drainant en profondeur. L'enracinement plus superficiel (moins cependant qu'avec

le désherbant) augmente l'épaisseur exploitée. Par contre, la consommation d'eau par les plantes du gazon intervient en sens inverse. Il est vraisemblable que le bilan de ces actions conduit à une diminution de l'eau disponible pour l'arbre, sans qu'on puisse avoir de certitude à ce sujet comme on le verra à propos des effets sur l'arbre.

b) *La quantité d'éléments nutritifs disponibles* dépend schématiquement de l'épaisseur de sol exploitée par les racines et de l'état chimique des différents horizons.

L'absence de travail du sol provoquant une répartition plus superficielle des racines, celles-ci exploitent ainsi la zone la plus riche, ou la plus facilement enrichie. Cet effet est surtout marqué pour les parcelles désherbées qui bénéficient encore d'autres facteurs favorables :

— absence de concurrence d'une végétation herbacée,

— accélération de la minéralisation de l'azote au printemps grâce aux températures plus élevées,

— pas d'immobilisation d'azote par humification ; au contraire, libération d'azote (et de phosphore), au moins pendant les premières années.

Par contre, la sécheresse relative qui a suivi la mise en place de l'essai a sans doute entravé l'installation des racines dans la zone de surface sous gazon.

3.5.3. *Résultantes des effets précédents* :

a) En ce qui concerne l'alimentation hydrique des arbres, il faudrait étudier la balance entre les flux d'eau fournie par le sol (offre) et les besoins climatiques (demande). En fait, l'influence des modes d'entretien sur la demande (effet de végétation adventice ou associée sur le degré hygrométrique, par exemple) ne peut être analysée étant donné les influences réciproques entre parcelles voisines.

b) L'évolution de la nutrition minérale au cours du temps, d'après l'analyse des feuilles, a été schématiquement la suivante :

— pour le désherbant, constamment supérieure au témoin (significativement à partir de 1966) ;

— pour l'engrais vert, peu de différences avec le témoin, sinon au début pour l'azote ;

— pour le gazon, effet dépressif initial, puis niveaux du témoin dépassés : l'effet de concurrence pour l'azote provoqué par l'humification s'est atténué peu à peu, et le rythme de fourniture de cet élément a pu être modifié favorablement. Les racines des arbres se sont installées dans les couches superficielles du sol.

3.6. *Effets sur la croissance et le rendement* (cf. fig. 10).

Par rapport au témoin, l'effet du *désherbage total* devient positif au bout de quelques années, tant sur la vigueur que sur le rendement.

Etant donné que les augmentations les plus importantes de rendement ne correspondent pas toujours aux années particulièrement sèches (maxima en 1968, année humide), l'alimentation en eau ne devrait pas être inférieure à celle du témoin (cf. 3.5.2, *a*) et ne semble pas être à l'origine des augmentations constatées.

La nutrition minérale étant meilleure que celle du témoin, on peut penser qu'elle est à l'origine des effets positifs observés. Il est peu probable que — pour le désherbant comme pour les autres modes d'entretien — il y ait lieu de faire intervenir à ce

sujet la nutrition en phosphore, les différences dans la composition des feuilles restant peu accusées, et l'action de cet élément étant difficile à mettre en évidence en arboriculture fruitière, sinon pour des cas extrêmes. On ne peut exclure une influence des modifications de la nutrition potassique, mais elle a sans doute été plus ou moins estompée — pour tous les modes d'entretien — par les fumures potassiques copieuses appliquées en profondeur. Dans ces conditions, il est concevable que l'amélioration de la nutrition azotée explique les effets constatés sur l'arbre, encore que d'autres éléments aient pu intervenir.

On peut aussi envisager un effet spécifique du produit herbicide. En fait, les herbicides persistants sont toxiques *in vitro* pour les arbres à pépins (Dermine, 1961-1963 ; Schmitlin, 1966). L'innocuité pratique, en verger, d'herbicides n'ayant pas de sélectivité biologique stricte fait intervenir la sélectivité de placement : fixation de l'herbicide dans la couche de sol superficielle, utilisée surtout par les racines d'adventices ; comme les radicelles d'arbres y poussent également, il faut admettre en plus une sélectivité biologique relative et une teneur en herbicide faible. Dans les conditions de l'expérience, on peut seulement affirmer que l'herbicide n'a pas *globalement* d'effet dépressif (résultante des effets spécifiques, effets sur la nutrition). Il semble également qu'il n'y ait pas eu d'accumulation d'herbicide, sa vitesse de décomposition étant suffisante.

Quoi qu'il en soit, des effets stimulants sur la croissance et les rendements ont été signalés par Karnatz (1965, 1967), Skroch et Chambers (1967), Lipecki (1968), Staalduine (1969), Lord *et al.* (1970), Baxter et Newmann (1971), Kuchly et Lherault (1973), Gormley *et al.* (1973).

Les effets de *l'engazonnement* sur la croissance et le rendement ont varié au cours du temps : la croissance, légèrement déprimée dans une première phase, dépasse ensuite celle du témoin ; par contre les rendements sont toujours inférieurs. Il est vraisemblable que la production de matière végétale a dépassé celle du témoin dans la dernière phase de l'essai, en accord avec le fait que la nutrition minérale, initialement inférieure à celle du témoin, lui est devenue égale, puis supérieure.

On a recherché si les variations de rendement sous gazon pouvaient s'expliquer par les conditions de sécheresse de chaque année. Un indice de besoin en eau a été calculé : quantité d'eau à apporter chaque année pour que la réserve du sol (supposée égale à 180 mm) ne s'annule pas. Il n'existe aucune liaison entre le rendement sous gazon avec dose double d'azote, exprimé en pourcentage du témoin, et l'indice précédent (fig. 9). Quoique celui-ci ait été calculé moyennant des hypothèses simplificatrices (évapotranspiration évaluée par formule climatique, eau également disponible dans l'intervalle capacité au champ point de flétrissement), on ne peut conclure que les diminutions de rendements soient plus accentuées les années sèches.

La variation de production de matière végétale (fruits + bois + feuilles) des arbres engazonnés étant parallèle à la nutrition azotée, celle-ci expliquerait une grande part des effets constatés. Mais il est difficile d'expliquer pourquoi l'effet dépressif a disparu sur l'appareil végétatif, alors qu'il a persisté sur la production des fruits. Peut-être aurait-il fallu attendre plus longtemps pour voir cesser l'effet négatif sur les rendements. L'influence de la multiplication des nématodes, ou plutôt celle d'une mauvaise adaptation de la taille, ne peuvent être présentées que comme des hypothèses.

Les améliorations très importantes des propriétés physiques de la surface cons-

tituent un luxe inutile, puisque les dégradations constatées avec le désherbage total sont sans effets. Ces améliorations n'ont pas que des conséquences heureuses : augmenter la quantité d'eau infiltrée accroît l'entraînement avec mélange de l'azote. Avec un sous-sol de propriétés médiocres, la pénétration d'une plus grande quantité d'eau peut prolonger la durée des phases pendant lesquelles le sol est mal ressuyé, ce qui réduit corrélativement l'aération. Dans ces conditions, des excès de précipitations peuvent même provoquer la mort des arbres : Cockcroft et Hugan (1964) ont constaté sur un essai une mortalité plus élevée sous gazon que sous désherbant, ce qui concorde avec les constatations faites dans la pratique concernant l'effet néfaste, sur l'asphyxie, des travaux du sol d'automne et d'hiver, favorisant l'infiltration.

Les échecs fréquents des semis de ray-grass, surtout à la fin de l'essai, ne permettent pas de tirer des conclusions générales quant aux conséquences à long terme de l'*engrais vert*. L'effet dépressif constaté certaines années, encore que beaucoup moins accentué qu'avec engazonnement, est difficilement explicable par la consommation d'eau de la plante associée, le témoin étant lui aussi couvert de végétation l'hiver : peut-être les repousses fréquentes après retournement au printemps contribuent-elles à des effets de ce genre. Cependant, la seule année (1965) pour laquelle les rendements ont été significativement inférieurs à ceux du témoin était humide. L'explication de l'effet dépressif pourrait résider plutôt dans la modification du rythme de fourniture de l'azote (cf. Trocmé et Gras, 1966).

L'influence des doses d'azote sur les rendements, malgré une tendance plus marquée au début en faveur de la dose double, notamment avec engazonnement, est restée peu accusée (fig. 11).

Aperçu méthodologique

Dans une première partie, nous examinerons la sensibilité des diverses mesures concernant les propriétés physiques. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus au début de l'essai et après un certain délai pour dégager quelques indications sur la durée minimum d'essais de ce genre.

1. — *Sensibilité des mesures sur les propriétés physiques du sol*

Une mesure est d'autant meilleure qu'elle est plus sensible aux effets des traitements et que sa dispersion aléatoire est plus faible.

Pour juger de cette dispersion, on utilise le coefficient de variation (CV) qui est l'écart-type résiduel exprimé en p. 100 de la moyenne générale.

Un petit coefficient de variation est souhaitable, mais ce paramètre n'est pas suffisant pour juger de la sensibilité d'une mesure comme nous allons le voir.

La densité apparente et l'indice de percolation qui sont tous deux en liaison avec la porosité ont des CV très différents : 4,1 à 6,4 p. 100 pour la densité apparente et 44,8 à 229,4 p. 100 pour l'indice de percolation transformé log ($\times + 0{,}1$). Mais les gammes de variations induites par les traitements sont beaucoup plus élevées pour cet indice (de — 1 à 2 soit une gamme de 3) que pour la densité apparente si on considère les moyennes par traitement ; dans ce dernier cas la gamme est seulement 1,65 — 1,10 = 0,55. De ce fait l'indice de percolation, malgré sa grande dispersion aléatoire, est plus apte à déceler les effets des traitements que la densité apparente.

C'est par exemple le cas de l'effet améliorant de l'engrais vert par rapport au témoin : la densité apparente passe de 1,16 à 1,14 seulement, alors que l'indice de percolation transformé passe de — 0,75 à 1,1 la différence étant significative à 5 p. 100. Les différences entre les 2 mesures sont reflétées par le rapport de la variance des traitements à la variance résiduelle, qui n'est autre que le rapport F de Snedecor. Ce rapport varie de 14,9 à 18,7 (moyenne 16,8) pour la densité apparente et de 6,7 à 78,3 (moyenne 32,8) pour l'indice de percolation. Ce qui intervient en définitive, c'est le rapport de la variance des traitements à la variance résiduelle. C'est donc ce rapport qui permet de juger de la sensibilité d'une mesure.

Malgré les réserves faites sur l'indice de percolation, celui-ci paraît plus apte à déceler certains effets que la densité apparente. Pour mieux contrôler le gradient de potentiel et la section de sol utilisée, on pourrait mesurer la perméabilité au laboratoire sur des échantillons prélevés à cet effet. Mais les difficultés sont déplacées au niveau du prélèvement d'échantillons de sols trop humides ou trop tassés, sans perturbation de la structure.

L'indice log 10 I_S d'instabilité structurale a un CV très faible et des rapports F toujours élevés de 36,4 à 91,0 (moyenne 53,1). Cet indice possède donc simultanément une grande sensibilité aux effets des traitements et une faible dispersion aléatoire.

En ce qui concerne le carbone organique, le CV est nettement plus faible pour la fraction liée (2,3 à 5,4 p. 100) que pour la fraction libre (18,7 à 21,5 p. 100).

2. — *Considérations sur la durée d'essais d'entretien du sol.*

Les tendances générales d'évolution des propriétés physiques étaient déjà visibles au bout de deux ans ; mais on ne pouvait prévoir à cette date des phénomènes tels que le passage par un maximum de la densité apparente sous gazon, la relative invariance dans le temps de l'indice de perméabilité avec désherbant et l'augmentation continue de ce même indice sous gazon, ou l'évolution de la densité apparente dans le sous-sol.

En présence d'apports organiques importants (gazon, mulch), il y a au début besoin d'azote et ensuite libération apparente, la quantité d'humus s'étant élevée entre temps. Ce changement de comportement demande beaucoup plus de deux ans pour se manifester.

Sous gazon, la nutrition minérale a subi des changements importants postérieurement à 1964 (redressement des nutritions azotée, phosphatée et potassique), alors que l'influence positive du désherbant s'est constamment maintenue dans le même sens, en s'accentuant au point de conduire à des différences significatives.

Pour les rendements, l'effet dépressif du gazon, visible dès 1964, s'est maintenu tout au long de l'essai, mais il a fallu attendre 1967 pour que l'action positive du désherbant devienne significative. Notons que la disparition des effets négatifs du gazon sur l'appareil végétatif des arbres a été manifeste aux alentours de 1967.

En définitive, du point de vue méthodologique, il semble que la durée minimum de cet essai aurait dû être de l'ordre de 6 ans au moins, si on ne voulait pas se limiter à constater les tendances d'évolutions des propriétés physiques. En effet, les influences des modes d'entretien sur la nutrition et le rendement ne se manifestent qu'avec un retard assez grand et le sens de certaines actions peut changer au cours du temps.

Conclusions

Dans la région parisienne, sans irrigation, avec un sol de propriétés physiques mauvaises, le désherbage chimique donne les meilleurs rendements cumulés sur 9 ans pour des pommiers conduits en haie fruitière. Viennent ensuite le sol nu travaillé et l'engrais vert d'hiver, puis l'engazonnement qui provoque un effet dépressif important. Cet effet du gazon sur le rendement ne peut s'expliquer uniquement en terme de concurrence entre l'arbre et la végétation installée pour l'eau et l'azote, l'alimentation azotée devenant supérieure à celle du témoin après quelques années. En fait, il y a une différence de réponse marquée entre vigueur des arbres et production de fruits, celle-ci paraissant inhibée dans une certaine mesure par l'engazonnement.

Les modes d'entretien interviennent aussi sur le « management » du verger, en facilitant plus ou moins la circulation des appareils de traitement et de transport, la réalisation des irrigations, etc... Si on examine les effets des modes d'entretien de ce point de vue, le classement obtenu avec les rendements est inversé. La circulation des véhicules, le déplacement des hommes sont plus faciles avec gazon qu'avec désherbant. Dans ce dernier cas, le ruissellement apparaissant après chaque pluie imposerait une pluviométrie horaire d'irrigation très faible. Par contre, le gazon faciliterait l'irrigation, en permettant l'infiltration de débits importants.

On peut formuler des conclusions d'ordre plus général.

Les propriétés physiques de la couche de surface paraissent avoir en arboriculture une importance moindre qu'en polyculture, si on fait abstraction de la conduite du verger (circulation, irrigation). En arboriculture, on n'a pas besoin de lit de semence (sauf éventuellement pour les plantes associées), la couche de surface servant surtout à la transmission des fluides (eau, gaz). Les constatations que nous avons faites, jointes à des analyses théoriques, amènent à penser qu'une mauvaise structure en surface perturbe peu l'aération du sous-sol, pourvu que la couche de mauvaises propriétés soit assez mince. Quoique l'infiltration soit réduite, l'alimentation en eau du végétal ne semble pas beaucoup affectée par la présence d'une telle couche. Elle peut même dans certaines conditions (sous-sol à mauvaise structure) réduire les risques d'asphyxie à la sortie de l'hiver, en limitant l'infiltration.

De plus, les divers modes d'entretien ont souvent des effets différents sur la couche superficielle de 10 cm et la couche sous-jacente de même épaisseur. Le désherbage provoque une dégradation des propriétés physiques en surface et une certaine amélioration au-dessous. Le travail du sol n'intervient que sur la couche superficielle concernée par ce travail, mais provoque indirectement le tassement de la terre en-dessous. L'effet améliorant du gazon s'atténue rapidement avec la profondeur, certainement en relation avec la densité des racines, la gazon étant surtout installé dans la couche superficielle. Ces constatations conduisent à considérer les conséquences des modes d'entretien sur l'ensemble du profil.

L'absence de tout apport organique (désherbage chimique) entraîne une diminution assez lente de la matière organique du sol, diminution qui n'a pas d'effet sensible sur la production des arbres, même si, dès le départ, les propriétés physiques de la surface du sol sont mauvaises et le taux de matière organique peu élevé. On peut donc envisager sans inconvénient des modes d'entretien sans apport organique, du

moins pour des vergers d'assez courte durée. On remarquera toutefois que l'installation de mousses sur les parcelles désherbées a pu contrebalancer en partie la diminution du taux de matières organiques. Des inconvénients pourront apparaître par contre à la suite de l'emploi des désherbants lors de la plantation suivante ou du passage de l'arboriculture à la polyculture (tassement excessif de la terre, rémanence des produits, etc.).

Les modes d'entretien interviennent de façon importante sur la nutrition des arbres. Dans le cas de l'azote, l'action des modes d'entretien est nettement plus marquée que celle de la fumure azotée ; de plus l'intensité et le sens de cette action peuvent varier au cours du temps (nutrition azotée sous gazon réduite puis accrue). L'entretien du sol constitue un moyen efficace, mais pas toujours facile à mettre en œuvre, d'agir sur la nutrition.

Ces observations donnent à penser que l'installation du système radiculaire, son fonctionnement, l'influence de la dynamique de l'eau sur les éléments solubles, sont des facteurs aussi importants que la richesse du sol pour obtenir une bonne nutrition minérale, en dehors des cas flagrants de concurrence entre l'arbre et la végétation adventice ou associée.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

Nous tenons à remercier MM. MONNIER, GOUNY et DELAS (Stations de Science du Sol ou d'Agronomie INRA d'Avignon et Bordeaux) pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Soil management trial in an apple orchard

In an orchard soil management trial two sets of treatments were compared in a split plot design. The treatments of the main plots are : spontaneous winter grass cultivation, winter cover cropping, weed control by means of chemicals, and permanent sward. The sub plots received two nitrogen dressings.

This experiment which lasted 9 years enabled to study the evolution of the soil characteristics, the nutrition and the yield of apple trees.

Under the experimental conditions (Paris region, no irrigation) the highest yield corresponded to the weed control and the lowest to the sward.

Zusammenfassung

Experimentelle Bodenpflege in einem Apfelbaumobstgarten

Während experimenteller Bodenpflege im Obstgarten wurden zwei Behandlungskombinationen dank einer aus unterteilten Parzellen bestehenden Anlage verglichen. Die Hauptbehandlungen waren die folgenden : gepflegter Boden mit spontaner Wintergrasbewachsung, gepflegter Boden mit Wintergründüngung, chemische Unkrautvernichtung, Rasen und die Nebenbehandlungen zwei Stickstoffzufuhren.

Dieser neunjährige Versuch hat es ermöglicht, die Entwicklung der Bodeneigenschaften, der Ernährung und des Ertrags der Apfelbaümen zu folgen.

Unter den Versuchsbedingungen (Parisergebiet, keine Bewässerung) entsprach der höchste Ertrag der Vollständigen Unkrautvernichtung und der niedrigste dem Rasen.

РЕЗЮМЕ

Опыт обработок почвы в яблочном саду.

Р. ГРА, С. ТРОКМЕ.

В опыте, проведенном в яблочном саду, сравнивались две серии обработок почвы на подразделенных делянках (сплит-плот). Применялись следующие главные способы обработки: обрабатываемая почва с непосредственным травяным прикрытием зимой, обрабатываемая почва с запахиванием зеленого зимнего удобрения, химической прополкой, задернением и вторичным обработками с внесением двух доз азотного удобрения.

Опыт продолжавшийся девять лет позволил проследить эволюцию почвенных свойств, питания и продуктивности яблонь.

В условиях опыта (Парижский район, без орошения) наилучшая продуктивность соответствовала полной химической прополке, а наименьшая-задерненной почве.

Références bibliographiques

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, **15,** 161-172.

BAKER C., 1937. Changes in total nitrogen under each of several cover crops after twenty three years. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **35,** 306-307.

BARLEY K., 1954. Effect of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam. *Soil Sc.*, **78,** 205-210.

BARLEY K., SEDGLEY R., 1958. Effect of root growth and decay on the capillary conductivity of a sandy loam at low soil moisture tension, *Soil Sc.*, **86,** 175-179.

BAXTER P., NEWMAN B., 1971. Orchard soil management trials. *Austral. J. Exp. Agric. Animal Husb.*, **11,** 105-112.

BELOBROV A., 1972. The effects of simazine and atrazine on the microflora and on changes in soil nutrient contents in orchards. *Khim. Sel' Kom Khoz.*, **10,** 52-53.

BOULD C., HUGHES H., GUNN E., 1972. Effects of soil management and NPK fertilizers on tree growth, yield and leaf nutrient composition of dessert apples. *Exp. Hort.*, **24,** 25-36.

BULFIN M., GLEESON T., 1967. A study of surface soil conditions under a non cultivation management system. *Irish J. Agric. Res.*, **6,** 177-201.

CHEVALIER H., 1965. Essais de comparaison du travail du sol et de l'enherbement sous verger *CR* 96e *Congrès Pomol.*, Paris, 176-182.

COCKCROFT B., HUGHAN D., 1964. Peach soil management trial Tatura 1948-1957. *Station report* n° 2. *Department of agriculture-Victoria.*

COKER E., 1959. Root development of apple trees in grass and clean cultivation. *J. Hort. Sc.*, **34,** 111-121.

DAGNÉLIE P., 1969. *Théories et méthodes statistiques. Applications agronomiques*, t. 2, 1 vol., Duculot éd.

DARVÈS-BORNOZ *et al.*, 1964. *Etude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation en France métropolitaine.* Ministère de l'Agriculture-Direction Générale du Génie rural et de l'Hydraulique.

DERMINE E., 1961-63. Rapport Station Grand Manil (Gembloux).

de FLAUJAC G., 1967. *Caractérisation à la sortie de l'hiver des différences de structure d'un sol de verger soumis à des modes d'entretien différents.* Rapport de stage effectué au Laboratoire des Sols.

FREY F., 1973. *Untersuchungen über Wirkungen vom im Obstbau verwendeten Herbiziden auf verchiedene Gruppen bodenbewohnender Nematoden.* Rheinischen Friedrich Wilhelm Univ. Bonn, 126 p.

FRITH., 1952. Some effect of no cultivation on the yield and growth of citrus trees. *Austral. J. Agric. Res.*, **3,** 259-276.

GORMLEY R., ROBINSON D., O'KENNEDY N., 1973. The effects of soil management on the chemical composition and quality of apples. *J. Sci. Food. Agric.*, **24,** 227-247.

GRAS R., 1965. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. I. Action sur les propriétés physiques du sol. *Ann. agron.*, **16,** 663-700.

GRAS R., SCHMITLIN B., TROCMÉ S., 1966. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. III. Action sur la production et la vigueur des arbres. *Ann. agron.*, **17,** 203-217.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. *C. R. VIe Congrès Int. Sc. Sol*, Paris, vol. B, 49-52.

KARNATZ H., 1965. Uber die Wirkung einiger Herbizide auf Wuchs-und Ertragsleistung von Apfelbäumen. *Pflanzenkr.*, Sonderh., **3,** 149-155.

KARNATZ H., 1967. Üntersuchung über die Toleranz einiger Herbizidwirkstoffe zu neugepflanzten Apfelbäumen. *Mitt. Obst. Versuchsreg Jork*, **22,** 467-473.

KIMBALL M., WALLACE A. *et al.*, 1951. Non tillage without covercropping in a California citrus orchard. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **58,** 141-145.

KOTOV V., 1964. L'entretien du sol dans les vergers de pommiers en production de la zone « non tchernoziom ». *Vest Salsk Nauk.*, n° 2, 71-80.

KUCHLY J., LHERAULT P., 1973. Désherbage des fruits à pépins. *C. R. Conf. Columa.*

LIPECKY J., 1968. Studies on the influence of the prolonged application of herbicides on the growth and fruiting of apples. *Ann. Univ. M. Curie*, **23,** 213-224.

LORD W., DAMON R., GERSTEN B., 1970. Comparative response of 3 apple rootstocks to soil incorporated simazine. *J. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **95,** 739-799.

MARKS C., SAIDAC W., TOWNSEND S., 1973. Effect of soil management on number of root lesion nematode P.p., *Canad. J. Plant Sc.*, **53,** 181-185.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13,** 55-63.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse. Paris.

MONNIER G., GRAS R., 1965. Action d'une culture d'engrais vert sur les propriétés physiques d'un sol de verger,. *Ann. agron.*, **16,** 553-577.

PISANI P., 1960. Osservazioni sul comportamento del sistema radicale del pesco e sul contenuto idrico del terreno in rapporto alla diversa tecnica colturale. *Riv. Ortofrutticoltura*, **85,** 1-2.

POULY C., 1969. *Modes d'entretien du sol en arboriculture fruitière.* Rapport de stage effectué au Laboratoire des sols.

PROEBSTING E., 1952. Some effects of long continued cover cropping in a California orchard. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **60,** 87-90.

PROEBSTING E., 1955. Weeds sprays as a substitute for cultivation in California orchards. *Rep.* 14 *Hort. Congr.* 796-799.

REDLICH G., 1965. Enherbement et engrais verts. *C. R.* 96e *Congrès Pomol.* Paris, 168-175.

SCHMITLIN B., 1966. Communication personnelle.

SCHMITLIN B., 1969. Herbicides et entretien des sols en verger. *C. R. Conf. Columa.*

SHANKAR H., KUMAR M., 1969. Effect of some herbicides on available nutrients in soils. *J. ind. Soc. Soil, Sc.*, **17,** 15-18.

SIMON-SYLVESTRE G., 1967. Premiers résultats d'une étude sur les effets de la désinfection des sols par la vapeur. *Ann. agron.*, **18,** 243-266.

SIMON-SYLVESTRE G., 1974. Complexité des effets des herbicides sur l'équilibre biologique des sols. *Agrochimica*, **18,** 334-343.

SKROCH W., CHAMBERS E., 1967. Weed control in apple orchards. *Proc. 20th South Weed Conf.*, 126-129.

STAALDUINE D., 1969. Several years's weed control in apple orchards. *Tuinb. Meded.*, **32,** 149-159.

TROCMÉ S., 1966. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. II. Action sur la nutrition des arbres. *Ann. agron.*, **17,** 5-19.

TROCMÉ S., GRAS R., 1966. L'entretien du sol en arboriculture fruitière. Résultats d'un essai sur Pommier. *C. R. Acad. Agric.*, 886-896.

TROCMÉ S., 1970. Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligoéléments. *Ann. agron.*, **21,** 519-548.

VAN BAVEL C., 1951. A soil aeration theory based on diffusion. *Soil Sc.*, **72,** 33-46.

VAN RHEE J., NATHANS S., 1961. Observations on earthworm populations in orchard soils. *Neth. J. Agric. Sc.*, **9,** 94-100.

Ann. agron., 1977, **28** (3), 261-275.

Relations entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux de soja (*Glycine Max. L. Merr.*)

R. BLANCHET, N. GELFI et M. BOSC

avec la collaboration technique de J. LAURENT

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Toulouse, I.N.R.A.,
BP 12, 31320 *Castanet Tolosan*

Résumé

Afin d'apprécier le comportement en conditions sèches de différents types variétaux de soja, treize variétés d'origines et de groupes de précocité divers (00 à III) ont été cultivées en vases de végétation, en ambiance naturelle, selon trois régimes hydriques : transpiration maximale TM, 65p.100 TM et 45 p. 100 TM. Des observations un peu détaillées (surfaces foliaires, composantes de la production) ont porté sur les huit variétés considérées comme les plus représentatives.

Selon les types variétaux, la consommation d'eau en TM varie plus que du simple au double, mais la transpiration par unité de surface foliaire est sensiblement constante ; les conditions sèches diminuent à la fois la surface foliaire et la transpiration par unité de surface.

La production de matière sèche totale de cet ensemble de variétés est, pour chaque régime hydrique, une fonction linéaire de la quantité d'eau consommée ; le régime TM conduit à une certaine consommation de luxe d'eau. La production de grain dépend à la fois de l'alimentation hydrique, des modalités de fructification et du rapport grain/matière sèche totale ; les valeurs élevées de ce rapport correspondent aux meilleures efficiences de l'eau. Parmi les composantes du rendement, le déficit hydrique affecte surtout le nombre de gousses par pied.

La relation photosynthèse nette — transpiration ne paraissant pas manifester une grande variabilité, on conclue à l'importance de rechercher, pour l'adaptation aux conditions sèches, des types variétaux possédant notamment une surface foliaire modérée, un puissant système racinaire, et un rapport grain/matière séche totale aussi élevé que possible.

Introduction

Le soja est une espèce originaire de régions subtropicales à étés chauds et humides et nous avons montré dans des travaux antérieurs (Puech *et al.*, 1974 ; Station d'Agronomie Toulouse, 1974 ; Gelfi, 1975) que sa transpiration peut conduire à certains gaspillages d'eau, lorsque celle-ci lui est fournie en abondance. Ces travaux avaient principalement porté sur la variété Amsoy, la plus courante en France ; le fait qu'elle ait été sélectionnée dans une région assez pluvieuse des Etats-Unis (Middle-West) pourrait expliquer cette abondante consommation d'eau qui convient assez mal aux conditions plus sèches du sud de la France.

Les recherches réalisées sur ce sujet n'ont pas été jusqu'ici très détaillées, comme le montre notamment la synthèse réalisée par Mederski *et al.* (1973) ; aussi, nous

avons voulu examiner les relations consommation d'eau-production sur divers types variétaux de bonne productivité, présumés plus ou moins résistants à la sécheresse, et d'origine géographique plus diversifiée (Canada et Nord des Etats-Unis, Chine, Europe Centrale). Notre but était de déceler éventuellement de meilleurs comportements, d'apprécier l'influence de la durée du cycle végétatif sur les relations transpiration production, et enfin d'avoir une indication de la variabilité génétique de ces relations. Sur un plan plus appliqué, nous voulions également obtenir une indication des productions possibles à partir de quantités d'eau croissantes, avec des variétés à cycle végétatif plus ou moins long, et placées dans des conditions de sécheresse diversement accusées. Cette approche était donc largement exploratoire.

Méthodes expérimentales

L'étude a été réalisée en vases de végétation portant quatre plantes chacun, en ambiance naturelle (abri grillagé), et de telle sorte que chaque variété soit conduite soit à sa transpiration maximale (TM), soit seulement à 65 p. 100 ou 45 p. 100 environ de celle-ci. Les pots du régime TM, placés dans des cuvettes formant réservoir, recevaient de l'eau à volonté (plan d'eau maintenu à 2 cm environ du fond du pot) ; l'évaporation à partir de la cuvette était empêchée par une plaque de polystyrène, et la consommation était contrôlée chaque jour par pesée.

Afin de ne pas handicaper le démarrage des jeunes plantes des deux autres traitements, le même régime TM leur a été appliqué depuis le semis (23 mai 1975) jusqu'au stade 4-5 feuilles trifoliées (10 juillet). Ensuite, les pots ont reçu journellement jusqu'à la maturité environ 65 p. 100 ou 45 p. 100 des consommations TM de la même variété, en évitant toutefois des flétrissements trop poussés risquant d'entraîner la mort ou le dessèchement définitif des feuilles. Vers la fin de la végétation, il s'est avéré que ces apports étaient parfois un peu excédentaires par rapport aux besoins des plantes, dont le développement était moindre, et la maturité un peu plus précoce que dans les traitements TM ; les arrosages étaient alors réalisés de façon que l'humidité du sol ne dépasse pas la capacité au champ ; les apports exacts étaient répertoriés dans tous les cas.

TABLEAU 1

Principaux caractères climatiques de la période de végétation

Données mensuelles	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.
Températures, degrés C						
— Max.....	19,5	23,5	25	25	21	12
— Mini.....	10,5	12	14	15	12	9
Insolations, heures	240	285	270	265	160	80
ETP fétuque Manade, mm. (évapotranspiration sur champ voisin)	118	148	159	133	80	59

Les pots étaient disposés de telle sorte qu'il y ait environ quinze plantes par mètre carré. L'évaporation à partir du sol était empêchée par un revêtement en matière plastique. La nutrition minérale était largement assurée, notamment par des apports réguliers d'azote minéral. Le tableau 1 indique les principaux caractères climatiques de la période de végétation.

Les variétés expérimentées, choisies avec le concours de spécialistes d'Amélioration des Plantes, différaient à la fois par leur origine géographique, leur développement végétatif, et la durée de leur cycle ; celle-ci variait dans la classification américaine du groupe 00 (très hâtif) aux groupes 0, I, II et III (très tardif pour nos régions). Le tableau 2 indique les caractères essentiels des huit types variétaux étudiés de manière assez détaillée ; des observations plus sommaires (consommation d'eau et production) ont porté sur cinq autres types (Evans 0, U.S.A. ; ISZ 1 et ISZ 12, I, Hongrie ; Heilong, I, Chine ; Wells, II, U.S.A.). Toutes ces variétés présentent le type habituel de feuillage, avec des folioles relativement larges ; nous ne disposions pas de variétés à folioles étroites.

TABLEAU 2

Caractères essentiels des principaux types variétaux étudiés

Origine	Variété	Groupe	Durée du cycle (jours)
CANADA	Altona	00	100
U.S.A.....	Swift	0	125
HONGRIE	GSZ 3	I	130
U.S.A.....	Hodgson	I	135
U.S.A.....	Steele	I	140
CHINE	Zao Feng	II	145
U.S.A.....	Amsoy	II	150
U.S.A.....	Williams	III	160

Lorsque la floraison a été bien établie chez tous ces types (28 juillet), les surfaces foliaires ont été évaluées sur les trois régimes hydriques des huit variétés principales, de la manière suivante :

— Quinze à vingt disques foliaires de 2,6 cm^2 ont été prélevés à l'emporte-pièce sur les divers traitements, de manière à mesurer dans chaque cas le poids sec correspondant à l'unité de surface foliaire.

— Sur un pot de chaque traitement, sacrifié à cet effet, toutes les feuilles ont été prélevées, séchées et pesées, et la surface foliaire a été calculée d'après le rapport $\frac{\text{poids sec du feuillage}}{\text{poids sec des disques}}$.

A la maturité, qui s'est étagée de début septembre à fin octobre selon les variétés, les productions de matière sèche totale, de feuilles sèches et de grains ont été contrôlées, ainsi que les nombres de gousses et de grains par plante.

Résultats

A. — *Développement végétatif et transpiration*

Le tableau 3 indique les principaux résultats obtenus à l'époque de la floraison sur les traitements TM, au cours de deux journées présentant des intensités différentes d'évapotranspiration (températures maximales de 27 °C et 35 °C). Les consommations varient plus que du simple au double selon les types variétaux, et le caractère plus ou moins exubérant de leur feuillage apparaît le principal responsable de ces écarts. En effet, dans les deux conditions climatiques différentes, les transpirations par unité de surface foliaire diffèrent peu selon le type variétal ; les résultats plus élevés obtenus avec Altona, très précoce, sont probablement dûs à la fois à la présence de gousses déjà développées, non comprises dans la surface foliaire mais susceptibles de transpirer notablement, et à un microclimat légèrement plus sec au niveau des feuilles peu abondantes.

TABLEAU 3

Transpiration des principaux types variétaux en régime TM, *au stade floraison, au cours de deux journées ayant présenté des températures maximales de* 27 °C (24 *juillet*) *et* 35 °C (28 juillet)

Groupe et variété	Surface foliaire (m^2 par pot)	Transpirations journalières (l par pot) à :		Transpirations journalières par m^2 de surface foliaire	
		27 °C	35 °C	27 °C	35 °C
00 Altona.....	0,44	0,57	1,0	1,33	2,35
0 Swift	1,32	1,56	2,41	1,17	1,81
I GSZ 3	1,08	0,89	1,96	0,82	1,82
I Hodgson	1,28	1,14	2,39	0,89	1,86
I Steele	1,24	1,32	2,37	1,06	1,90
II Zao Feng ...	1,60	1,40	2,81	0,88	1,77
II Amsoy	1,36	1,33	2,70	0,99	2,03
III Williams	1,12	0,96	1,94	0,86	1,76

Chez deux variétés bien représentatives de l'ensemble, Hodgson (groupe I) et Amsoy (groupe II), le tableau 4 indique le comportement des plantes placées en conditions sèches. Celles-ci ont fortement réduit les développements végétatifs et les surfaces foliaires ; la morphologie des feuilles a également été modifiée : plus petites, elles sont devenues plus épaisses (augmentation de leur poids sec par unité de surface). Ces modifications font qu'en journée fraîche, la transpiration par unité de surface foliaire est un peu plus élevée qu'en régime TM, alors qu'en journée chaude, où le sol se dessèche davantage, le traitement 45 p. 100 TM provoque encore une diminution de la transpiration par unité de surface.

De manière générale, on assiste donc à une sorte d'autorégulation assez rapide du développement végétatif en fonction des disponibilités hydriques. Nous avons pu observer qualitativement que cette réduction portait sur la taille des feuilles, le dia-

TABLEAU 4

Comportement de deux types variétaux, selon les régimes hydriques, au cours de deux périodes successives du développement (valeurs exprimées par pot de quatre plantes)

Caractères mesurés	Hodgson (groupe I)			Amsoy (groupe II)		
	TM	65 p. 100 TM	45 p. 100 TM	TM	65 p. 100 TM	45 p. 100 TM
1re *phase : Floraison et début de formation des gousses*						
Poids sec des plantes, g	68	50,5	43,5	78,8	58,5	53,3
Poids sec des feuilles, g.....	34	24,5	23	41	31	27
Poids sec de 1 dm^2 de feuilles, g...	0,265	0,38	0,42	0,305	0,384	0,404
Surface foliaire, m^2	1,28	0,65	0,55	1,35	0,81	0,67
Transpiration par m^2 de feuilles, g. m^{2-1}						
— journée fraîche (24.7)	0,89	1,10	1,13	0,99	1,08	1,17
— journée chaude (28.7)	1,86	1,93	1,65	2,03	1,94	1,67
Accroissement de M.S. depuis la différenciation des traitements, g.	54	36,5	29	65,4	45,1	39,9
Rapport M.S. produite/surface foliaire (g. m^{2-1})	42	56	53	48	55	59
Consommation d'eau, l.....	22,8	14,1	10,7	26,3	16,9	14,1
Efficience de l'eau consommée (g. l^{-1})	2,37	2,59	2,71	2,49	2,67	2,83
p. 100 de réduction transpiration .	—	38	53	—	36	47
p. 100 de réduction M.S. produite.	—	33	47	—	31	39
2e *phase : Formation des gousses à maturité*						
Poids sec total à la récolte, g.....	307	215	175	382	233	207
Poids de feuilles à la récolte, g....	49,5	34,4	31,5	62,9	44,7	40,3
M.S. produite au cours de la phase, g	239	164,5	131,5	303,2	174,5	153,7
Eau consommée, l	97	52	42	119	59	48
Efficience de l'eau consommée (g. l^{-1})	2,47	3,16	3,13	2,56	2,95	3,20
p. 100 de réduction transpiration..	—	46	57	—	50	60
p. 100 de réduction M.S. produite..	—	31	45	—	43	49

mètre des tiges et la longueur des entre-nœuds, sans réduction marquée du nombre de nœuds, de feuilles et de bouquets floraux.

L'efficience de l'eau consommée, c'est-à-dire le rapport $\frac{\text{photosynthèse nette}}{\text{transpiration}}$, s'accroît dans ces traitements secs, ainsi que le rapport de la matière sèche produite à la surface foliaire. La réduction des organes végétatifs s'accompagne donc d'un accroissement de leur activité assimilatrice.

A partir de ce stade de la formation des gousses, et compte tenu de l'autorégulation du développement végétatif, on peut considérer que les traitements « secs » se sont en fait trouvés de plus en plus proches de leur propre transpiration maximale, celle-ci étant naturellement beaucoup plus faible que chez les plantes plus exubérantes du traitement TM. Le tableau 4 (2e phase) montre qu'au cours de cette période, qui correspond à la production d'une forte proportion de la matière sèche totale, l'effi-

cience de l'eau consommée est demeurée plus élevée chez ces plantes à développement végétatif réduit ; les organes assimilateurs (feuilles, mais aussi gousses et même tiges) ont donc continué à présenter un meilleur rapport $\frac{\text{photosynthèse nette}}{\text{transpiration}}$. La production totale a toutefois été fortement amoindrie.

L'évolution des surfaces foliaires n'a pas été mesurée au cours de cette seconde phase, mais l'examen des poids de feuilles à la récolte (maturité) montre que le développement des organes végétatifs s'est poursuivi dans les divers traitements en conservant sensiblement les écarts relatifs observés à l'époque de la formation des gousses. Chez l'ensemble des variétés, les poids de feuilles à maturité des traitements 45 p. 100 TM représentaient environ 65 à 80 p. 100 des feuilles des régimes TM, les plus fortes réductions s'étant manifestées sur les variétés tardives. Compte tenu du rapport poids/surface plus élevé dans les traitements « secs » (tabl. 4), on peut estimer que la surface foliaire totale est restée réduite d'environ la moitié en 45 p. 100 TM, et d'environ un tiers en 65 p. 100 TM.

Le tableau 4 montre que les réductions de transpirations par rapport aux traitements TM ont été plus accusées qu'au cours de la phase précédente, restreignant davantage chez la variété Amsoy — mais non chez Hodgson — la production de matière sèche. Malgré cette légère différence de comportement, l'efficience de l'eau consommée est restée voisine chez les deux variétés pour les traitements homologues, et nettement améliorée par les limitations de l'alimentation hydrique et du développement végétatif (au détriment de la production totale). L'efficience a été d'autre part, plus élevée qu'au cours de la première phase, très probablement en raison de conditions climatiques entraînant une moindre transpiration (tabl. 1).

B. — *Fructification*

La quantité de grain fournie par un plant de soja est le produit :

Poids de grain = nombre de gousses × nombre de grains par gousse × poids moyen d'un grain.

Chez l'ensemble des types variétaux, la restriction de l'alimentation hydrique a surtout diminué le nombre de gousses par plant, comme l'illustre le tableau 5. Ainsi que l'ont observé divers auteurs (Puech *et al.*, 1974 ; Mingeau, 1974), les nombres de grains par gousse et les poids moyens d'un grain sont généralement moins altérés que le nombre de gousses.

Le comportement de la variété Hodgson a été ici particulièrement typique à cet égard : le nombre de grains par gousse et le poids des grains sont restés très sensiblement constants, et la contrainte hydrique s'est répercutée sur le nombre de gousses. Chez cette variété, le nombre moyen de gousses par nœud est passé sur la tige principale d'environ 3,5 en TM à 3,1 en 65 p. 100 TM et 2,7 en 45 p. 100 TM ; la fructification a été fortement handicapée sur les ramifications.

Chez d'autres types variétaux, les comportements ont été parfois un peu différents : les variétés à maturité précoce (Altona, Swift) ont conservé en conditions sèches une fructification assez abondante, mais le poids des grains a été nettement diminué. Par contre, les variétés tardives (Zao Feng, Amsoy, Williams) ont eu une réduction marquée du nombre de gousses dans le traitement le plus sec, sans altération du poids des grains ; ce comportement peut être lié au déficit hydrique plus intense subi lors

TABLEAU 5

Composantes de la production dans les différentes conditions d'alimentation hydrique (résultats exprimés par pot de quatre plants)

Groupe et variété	Traitement	Nombre de gousses par pot		Nombre de grains par gousse	Poids de 1 000 grains, g	Poids total de grains, g
		Total	p. 100 TM			
00 Altona	TM	194	100	2,1	221	90
	65 p. 100 TM	135	69	2,0	144	38,6
	45 p. 100 TM	133	67	2,0	153	41,5
0 Swift	TM	286	100	2,4	182	127,6
	65 p. 100 TM	197	67	2,5	174	86,2
	45 p. 100 TM	174	61	2,5	161	71,4
I GSZ3	TM	269	100	2,2	158	93,9
	65 p. 100 TM	196	72	2,1	146	61,6
	45 p. 100 TM	176	65	1,9	170	57,3
I Hodgson	TM	390	100	2,1	178	143,1
	65 p. 100 TM	268	68	2,1	180	102,4
	45 p. 100 TM	229	58	2,1	174	83,2
I Steele	TM	279	100	2,3	187	121,9
	65 p. 100 TM	209	74	2,4	192	96,1
	45 p. 100 TM	187	66	2,2	190	78,9
II Zao Feng	TM	260	100	2,1	245	130,3
	65 p. 100 TM	175	67	1,9	234	79,7
	45 p. 100 TM	147	56	2,1	257	77,8
II Amsoy	TM	357	100	2,5	179	158
	65 p. 100 TM	254	70	2,1	164	88,2
	45 p. 100 TM	197	55	2,4	191	92,3
III Williams	TM	322	100	2,3	184	136,1
	65 p. 100 TM	228	70	1,9	192	84,2
	45 p. 100 TM	170	52	2,4	184	75,3

de la formation des gousses que lors de la maturation, qui s'est effectuée chez ces variétés en conditions peu évaporantes, et de manière assez lente.

Enfin, on peut remarquer que certaines variétés, notamment Steele et même GSZ 3, dont la fécondité n'est pas considérable en régime TM, n'ont pas subi dans les traitements secs une réduction très marquée du nombre de gousses ; ce caractère peut être intéressant. Le défaut de fructification en présence de contrainte hydrique semble en effet provenir beaucoup plus de difficultés de fécondation et de nouaison que d'un manque de production de fleurs ; généralement, celles-ci restent surabondantes même en conditions sèches, et c'est la formation de gousses à partir de ces fleurs qui fait défaut (Puech *et al.*, 1976).

C. — *Production de matière sèche totale et de grain*

Le tableau 6 indique les productions obtenues sur les huit principaux type variétaux en régimes TM et 45 p. 100 TM. Les quantités de matière sèche totale produites suivent une variation assez voisine des consommations d'eau et des poids de feuilles sèches recueillies à maturité, dont l'abondance reflète celle des organes végétatifs.

TABLEAU 6

Consommation d'eau, production et efficience de l'eau consommée, pour les principaux types variétaux soumis à deux régimes hydriques différents (résultats exprimés par pot de quatre plants)

Groupe et variétés	Eau consommée l	Poids feuilles sèches g	Matière sèche totale, g	Grains secs g	Rapport grain M.S.T.	Efficience eau (g/l) sur grain	Efficience eau (g/l) sur M.S.T.
Régime TM							
00 Altona	73	30,6	187	90	0,48	1,23	2,56
I GSZ 3	90	35,7	214	94	0,44	1,04	2,38
0 Swift.....	106	38,3	248	128	0,515	1,21	2,34
I Steele	109	47	288	122	0,425	1,12	2,64
I Hodgson	120	49,5	307	143	0,465	1,19	2,56
II Zao Feng	129	62,5	322	130	0,40	1,01	2,50
III Williams	140	66,5	379	136	0,36	0,97	2,70
II Amsoy	145	62,9	382	158	0,41	1,09	2,63
45 p. 100 TM							
00 Altona	30	23	108	41,5	0,38	1,37	3,60
I GSZ 3	43	29,6	134	57,3	0,425	1,33	3,12
0 Swift.....	47	27,1	151	71,4	0,47	1,51	3,21
I Steele	49	29,9	164	78,9	0,482	1,61	3,35
I Hodgson	53	31,5	175	83,2	0,475	1,57	3,30
II Zao Feng	58	41,5	187	77,8	0,415	1,34	3,22
III Williams	58	45	200	75,2	0,375	1,29	3,45
II Amsoy	62	40,3	207	92,3	0,445	1,48	3,34

La figure 1 qui représente les productions des treize variétés expérimentées en fonction des consommations d'eau, précise ces données. Dans la gamme de consommations réalisées ici, les quantités totales de matière sèche produite (y) sont, pour chaque régime hydrique, une fonction linéaire de la consommation (x), et les corrélations sont particulièrement étroites :

— TM : $y = 2{,}97\,x - 45$; coefficient de corrélation = 0,98,
— 65 p. 100 TM : $y = 3{,}43\,x - 20{,}8$; coefficient de corrélation = 0,98
— 45 p. 100 TM : $y = 3{,}33\,x - 3{,}9$; coefficient de corrélation = 0,98.

L'écart entre les droites se rapportant à TM et aux deux autres traitements (fig. 1) manifeste bien la « consommation de luxe » d'eau, que nous avons déjà mise en évidence sur la variété Amsoy lorsqu'elle est abondamment alimentée en eau, et qui apparaît ici assez identique chez les autres variétés,

La production totale de matière sèche étant le reflet de la photosynthèse nette, il n'apparaît pas, sur cet échantillonnage variétal, de grande variabilité des types de sojas quant à la relation photosynthèse nette — transpiration, ni par conséquent quant à l'efficience de l'eau à l'égard de la production totale de matière sèche. Dans les régressions ci-dessus, l'existence d'une ordonnée à l'origine négative indique que l'efficience a été en moyenne d'autant plus élevée que les consommations étaient plus fortes (c'est-à-dire en fait chez les variétés tardives), mais les valeurs du tableau 6 montrent que les écarts sont faibles, et non systématiques.

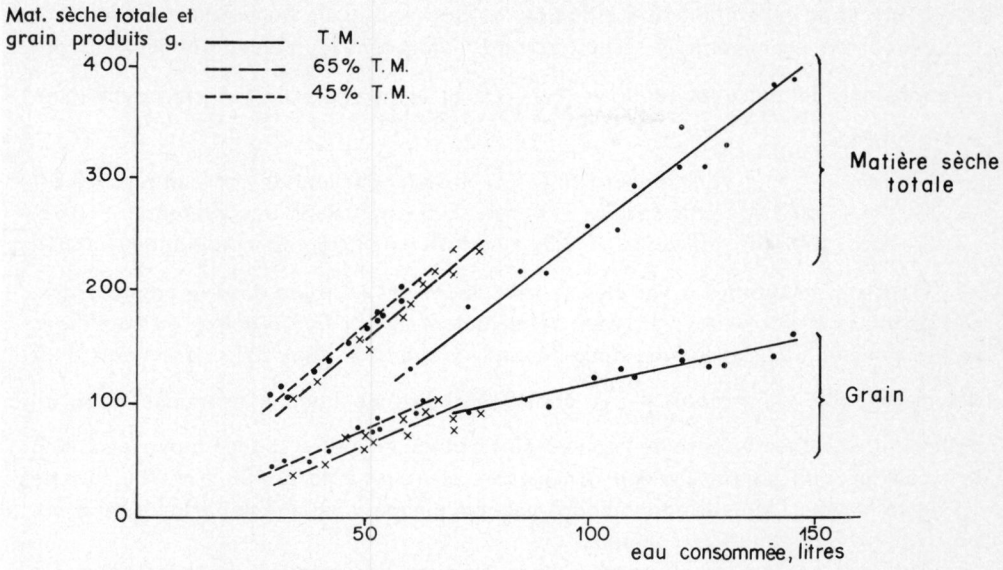


FIG. 1. — *Productions de matière sèche totale et de grains, en fonction des quantités d'eau consommées.*

On aurait pu penser que les variétés précoces, à cycle végétatif plus court, présenteraient un avantage en matière d'efficience de l'eau consommée. Un tel avantage ne s'est pas manifesté ici, dans les conditions climatiques intervenues, qui sont assez bien représentatives du climat de la région toulousaine ; l'essentiel de la végétation de ces variétés précoces s'est déroulé en conditions de forte évapotranspiration, qui ne favorisaient pas une efficience élevée. Chez les variétés tardives, les températures peu élevées de Septembre et Octobre ne conduisaient pas à une forte consommation d'eau, mais la photosynthèse était également limitée, et par conséquent l'efficience. Il n'apparaît pas ainsi d'avantage marqué d'un groupe de précocité, ni de manière générale une grande variabilité génétique. Ce sont plutôt les modalités d'alimentation hydrique qui ont influencé l'efficience de l'eau consommée, et les résultats détaillés que nous avons obtenus précédemment sur la variété Amsoy (Station d'Agronomie Toulouse, 1974 ; Gelfi, 1975) apparaissent ainsi de portée assez générale pour l'espèce.

La figure 1 indique également les productions de grains obtenues en fonction des consommations d'eau. En TM, la pente de la droite est notablement plus faible que dans les régimes secs (l'efficience de l'eau consommée est moindre). D'autre part, les points sont parfois assez dispersés autour des droites moyennes, laissant entrevoir des comportements variétaux plus différenciés que dans la synthèse de matière sèche totale. La production de grains est en effet plus complexe : elle fait intervenir d'une part les processus de fructification, déjà évoqués ci-dessus, et d'autre part le transfert de métabolites des organes végétatifs vers les graines. A cet égard, le tableau 6 montre qu'en régime TM, où la contrainte hydrique n'a pas limité la fructification, les rapports $\frac{\text{grain}}{\text{matière sèche totale}}$ diffèrent notablement selon les types variétaux (0,36 à 0,51). Les variétés ne possédant pas une trop forte « charpente » et ayant réalisé le mieux ces accumulations de métabolites dans les grains, ont présenté les efficiences de l'eau les plus élevées (quantités de grain produites par litre d'eau consommée).

L'intérêt de cette aptitude à mobiliser au profit du grain les produits du métabolisme s'accroît en conditions sèches, comme l'indiquent les pentes plus élevées des relations existant entre les rapports $\frac{\text{grain}}{\text{M.S.T}}$ (r) et les valeurs de l'efficience de l'eau consommée :

— TM : efficience = 1,72 r + 0,36 (coefficient de corrélation = 0,83)
— 65 p. 100 TM : efficience = 2,92 r + 0,06 (coefficient de corrélation = 0,92)
— 45 p. 100 TM : efficience = 2,84 r + 0,18 (coefficient de corrélation = 0,81).

Dans ces relations, les variétés ne se classent pas toujours dans le même ordre, car certaines d'entre elles fructifient relativement mieux que d'autres en conditions sèches (Steele, GSZ 3), comme nous l'avons vu ci-dessus (tabl. 5) ; néanmoins, l'influence globale du rapport $\frac{\text{grain}}{\text{M.S.T.}}$ dans l'efficience de l'eau consommée apparaît nettement. Si cette efficience de l'eau est plus grande en milieu sec (en moyenne 1,40 g de grain produit par litre d'eau consommée en régime 45 p. 100 T.M., au lieu de 1,11 g en régime TM), elle dépend donc beaucoup également de l'importance du grain par rapport aux organes végétatifs.

On peut encore faire une remarque au sujet des relations existant entre ces rapports $\frac{\text{grain}}{\text{M.S.T.}}$ et la valeur absolue de la production, dans diverses conditions d'alimentation hydrique. La figure 2 indique ces relations, qui sont assez lâches (probabilité de n'être pas dûes au hasard comprise entre 5 et 10 p. 100), mais présentent l'intérêt d'une pente opposée selon que l'on se trouve en milieu sec ou humide : en régime TM, la production tend à diminuer chez cet ensemble de variétés lorsque le rapport $\frac{\text{grain}}{\text{M.S.T.}}$ augmente, et le contraire se produit en condition sèche. Cela signifie que les types vigoureux, possédant une forte charpente, mais ayant des besoins hydriques élevés, sont les plus productifs lorsque l'eau est abondante ; ils perdent

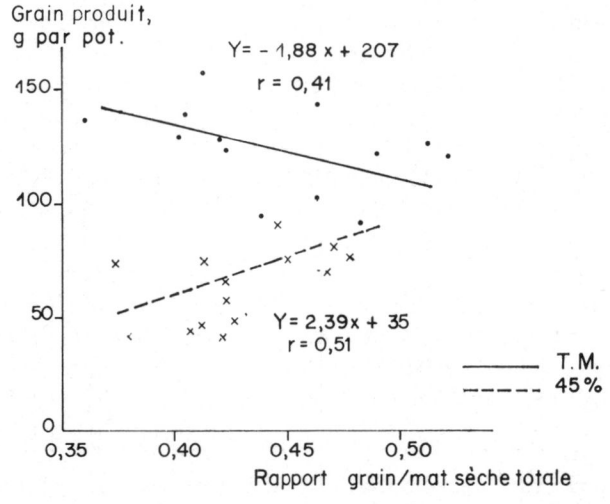


FIG. 2. — *Productions de grains, en fonction des rapports* $\frac{\textit{grain}}{\textit{matière sèche totale}}$

par contre en milieu sec l'essentiel de leurs avantages, et des types moins exubérants, où le grain prédomine sur les organes végétatifs, sont alors mieux adaptés. Ces faits nous ont été confirmés par les résultats obtenus au champ en 1975 ; par exemple, le type hongrois GSZ 3, peu développé, a fourni en l'absence d'irrigation un rendement sensiblement égal à celui de variétés américaines nettement plus vigoureuses, alors que celles-ci présentaient un net avantage en culture irriguée.

Discussions et conclusions

Adapter à des conditions relativement sèches une espèce originaire de zones humides est naturellement un problème difficile, dans lequel la maîtrise des conditions de culture (irrigation par exemple) doit se conjuguer à la modification génétique.

La transpiration et la photosynthèse nette totale de ces divers types de soja dépendent principalement de l'extension de leur appareil foliaire, et aucun des types étudiés ici ne présente d'adaptation marquée à une meilleure efficience de l'eau dans la production de matière sèche totale. La variabilité génétique de ce caractère paraît donc assez faible, malgré la grande disparité des consommations d'eau.

Afin de bien situer ces problèmes, nous discuterons d'abord la méthode expérimentale utilisée dans cette étude, puis les enseignements agronomiques qui s'en dégagent.

Méthode expérimentale utilisée

La contrainte hydrique subie par les traitements 65 p. 100 et 45 p. 100 TM est intervenue à un stade assez précoce (4-5 feuilles trifoliées), et elle a notamment eu pour conséquence une forte réduction du développement végétatif des plantes, en particulier de leur surface foliaire. Les besoins hydriques de ces traitements sont alors devenus moindres que ceux des témoins TM, et le feuillage moins abondant a été dans l'ensemble mieux éclairé. A partir de la formation des gousses, ces plantes ne se trouvaient plus en conditions physiologiques de sécheresse, sauf au cours des journées très chaudes, et l'appareil foliaire fonctionnait dans de bonnes conditions (rapports $\left(\frac{\text{matière sèche produite}}{\text{surface foliaire}}\right)$. L'efficience de l'eau consommée était également accrue.

Ces comportements sont naturellement contingents à la méthode expérimentale utilisée, et ne peuvent par conséquent être extrapolés sans précautions. Notons cependant qu'ils ne sont pas nécessairement très éloignés des conditions rencontrées au champ dans l'aire actuellement possible de culture du soja en France (Sud-Ouest et Midi méditerranéen) : les périodes très chaudes survenant fin juin-début juillet, à l'époque du développement végétatif et du début de la floraison, sont fréquentes, et suivies par des orages d'été. En l'absence d'irrigation, la croissance végétative est limitée, et le rendement dépend des pluies d'été. Ainsi, nous avons pu observer en 1975, année climatique assez moyenne dans cette région, sur la variété Amsoy cultivée au champ en sol possédant de bonnes réserves hydriques, des indices foliaires au stade formation des grains variant de 12 en culture irriguée à 5,5 en l'absence d'irrigation, et des productions respectives de grains d'environ 40 et 25 quintaux par hectare. En conditions sèches, la configuration des plantes (réduction de la taille des feuilles et des entre-nœuds, mais floraison encore relativement abondante) est assez

comparable à celle que nous avons obtenue dans cette expérience. Celle-ci doit donc être extrapolée prudemment, mais ses principaux enseignements apparaissent valables, pour l'espèce et l'aire de culture considérées.

Enseignements agronomiques

L'un des défauts du soja est précisément une tendance à l'exubérance des organes végétatifs, lorsque l'alimentation hydrique et azotée est bonne ; ce caractère est surtout marqué chez les types à maturité tardive dans nos régions, et s'accompagne d'une très forte consommation d'eau (Puech *et al.*, 1974).

On pouvait supposer que des variétés à cycle court, par conséquent soumises moins longtemps à la transpiration imposée par le climat, présenteraient une meilleure efficience de l'eau. En fait, leur végétation s'effectue en conditions plus chaudes, du moins en culture principale, et leur productivité est nettement moindre ; aussi, elles ne paraissent pas présenter à cet égard d'avantages bien marqués (tabl. 6 et fig. 1). Il est probable qu'elles présentent par contre une bonne efficience en culture dérobée, avec un semis intervenant vers le 1er juillet.

Dans la conduite des cultures, il importerait surtout d'éviter les gaspillages d'eau, et la satisfaction de l'évapotranspiration maximale n'est certainement pas toujours nécessaire (Boyer, 1970). L'écart existant entre les droites de la figure 1 (productions de matière sèche totale en TM et 65 p. 100 TM) illustre ce fait, dont nous avons analysé plus en détail les modalités par ailleurs (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976). En culture irriguée, les arrosages intervenant à l'époque de la formation des gousses et des grains apparaissent essentiels, et le maintien d'une transpiration représentant environ 80 p. 100 de l'ETRM doit permettre une activité photosynthétique assez proche du maximum.

Pour l'adaptation de cette espèce aux conditions sub-humides, il conviendrait surtout d'obtenir des types dont le développement végétatif, et par conséquent les besoins en eau, soient assez modérés. Une voie possible de réduction de la surface foliaire et de la consommation d'eau pourrait être l'utilisation de soja à feuilles plus étroites que les variétés usuelles, et nous nous proposons d'étudier prochainement leur comportement.

Les aptitudes à la fructification en conditions sèches, et à la mobilisation vers le grain des produits élaborés dans les tissus, revêtent également une grande importance (Ogren et Rinne, 1973), et on peut penser qu'il y a, dans l'étude des translocations de métabolites vers les gousses et les grains, un large champ de recherches fort intéressantes.

Enfin, quoique nous n'ayons pas abordé ici le problème de l'exploitation des réserves hydriques du sol par les racines, nous pouvons rappeler qu'un puissant système racinaire est, chez le soja comme chez d'autres espèces, un facteur très important de résistance à la sécheresse, et de maintien d'échanges gazeux actifs au cours des périodes de déficit hydrique (Sullivan et Brun, 1975 ; Arya *et al.*, 1975). Des observations en cours montrent que certains types variétaux possèdent des enracinements plus puissants que d'autres, sans que ce caractère soit forcément lié à la vigueur des parties aériennes.

En définitive, cette expérience montre qu'il n'existe pas, chez les types variétaux étudiés, de grande variabilité dans les relations photosynthèse nette totale-transpira-

tion. La variabilité est plus grande dans la production de grains ; outre l'aptitude à la formation de gousses, elle met notamment en jeu les rapports $\frac{\text{grain}}{\text{matière sèche totale}}$, c'est-à-dire un développement végétatif pas trop exubérant et une bonne aptitude au transfert de métabolites vers les graines. Des types de sojas adaptés aux conditions sèches devraient donc posséder ces divers caractères, avec une surface foliaire modérée et un puissant système racinaire.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

Ces travaux ont été conduits avec l'aide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (décision n° 74.7.0772), que nous tenons à remercier ici, ainsi que nos collègues d'Amélioration des Plantes qui nous ont aidés dans le choix des types variétaux (MM. Ecochard et Clavier).

Summary

Relationships between water consumption and production in various varietal types of soya bean (Glycine Max. L. Merr.)

So as to study the behaviour under dry conditions of different varietal types of soya bean, thirteen varieties from various origins belonging to different earliness groups (00 to III) were grown in vegetation vessels under natural atmosphere and submitted to three water regimes : maximum transpiration TM, 65 p. 100 TM, 45 p. 100 TM. More detailed observations (leaf area, production factors) bore on the 8 varieties considered as the most representative.

According to the varietal types the water consumption under maximum transpiration varies from one to two but the transpiration per leaf area unit is nearly constant ; dry conditions reduce both leaf area and transpiration per area unit.

The production of total dry matter of this group of varieties is linearly related to the amount of water consumed for each water regime ; the TM regime leads to a certain superfluous water consumption. Grain production depends at the same time on water supply, fructification modes and on the ratio grain/total dry matter ; the high values of this ratio correspond to the best water efficiencies. Among the yield factors the number of pods per stalk is mainly altered by water deficit.

As the relationship between net photosynthesis and transpiration does not seem to show a high variability it may be concluded that it is important to find out varietal types showing in particular a moderate leaf area, a strong root system and a ratio grain/total dry matter as high as possible to adapt to dry conditions.

Zusammenfassung

Beziehungen zwischen wasserverbrauch und produktion in verschiedenen sortentypen von sojabohnen (Glycine Max. L. Merr.)

Um das Verhalten verschiedener Sortentypen von Sojabohnen unter Trockenbedingungen zu studieren, wurden dreizehn Sorten aus verschiedenen Herkunft und Reifegruppen (00 zu III) in Vegetationsgefässen unter natürlichen Verhältnissen mit drei Wasser verhältnissen : maximale Ausdünstung TM, 65 p. 100 TM, 45 p. 100 TM bebaut. Etwas detaillierte Beobachtungen (Blattfläche, Produktionsfaktoren) betrafen die acht als typischeste betrachteten Sorten.

Den Sortentypen nach variiert der Wasserverbrauch zwischen eins und zwei unter maximaler Ausdünstung, aber die Ausdünstung pro Blattflächeeinheit ist ungefähr konstant ; Trockenbedingungen einschränken zugleich die Blattfläche und die Ausdünstung pro Flächeneinheit.

Die Produktion von Gesamttrockensubstanz dieser Sortengruppe ist für die drei Wasserverhältnisse eine Linearfunktion der verbrauchten Wassermenge ; die TM führt zu einem gewissen überflüssigen Wasserverbrauch. Die Kornproduktion hängt zugleich von Wasserzufuhr, Befruchtungsbedingungen und Verhältnis zwischen Korn und Gesamttrockensubstanz ab ; die hohen Werte

dieses Verhältnisses entsprechen den besten Wasserleistungsfähigkeiten. Unter den Ertragsfaktoren beeinflusst der Wasserverlust insbesondere den Schotenzahl pro Pflanze.

Da die Beziehung zwischen Nettophotosynthese und Ausdünstung nicht scheint, eine grosse Variabilität zu aüssern, schliesst man daraus dass es für eine Anpassung an Trockenbedingungen wichtig ist, Sortentypen mit vor allem einer mässigen Blattfläche, einem gewaltigen Wurzelsystem und einem Verhältnis zwischen Korn und Gesamttrockensubstanz so hoch wie möglich zu forschen.

РЕЗЮМЕ

Соотношение между потреблением влаги и продукцией у различных типов сортов сои (Glycine Max. L. Merr.).

Р. БЛАНШЕ, Н. ЖЕЛЬФИ, М. БОСК.

Чтобы оценить поведение различных типов сортов сои в засушливых условиях, тринадцать оригинальных сортов и групп разной раннеспелости этого растения (00-111), культивировались в вегетационных сосудах, в природном окружении, при трех разных водных режимах : максимальной транспирации Т.М., 65-ти % Т.М. и 45-ти % Т.М. Подробные наблюдения (листовая поверхность, составные продукции) проводились на восьми сортах, рассматривавшихся как наиболее характерные.

Потребление влаги при Т.М. изменяется больше чем в два раза, в зависимости от сорта, но транспирация на единицу листовой поверхности более или менее постоянна; в засушливых условиях и листовая поверхность, и транспирация на единицу этой поверхности, уменьшаются в одно и то-же время.

Продукция сухого вещества иисследоваными сортами находится, для каждого водного режима, в зависимости от количества потребленной влаги; при режиме Т.М. потребление это слишком велико. Продукция зерна зависит одновременно от водного питания, формы плодоношения и соотношения зерно : сумма сухого вещества; высокие значения этого соотношения соответствуют большей эффективности воды. Из составных урожая, водный дефицит особенно влияет на количество стручков на куст.

Ввиду слабых изменений соотношения чистый фотосинтез : транспирация, авторы приходят к заключению, что для применения к засушливым условиям необходимо подбирать типы сортов с умеренной листовой поверхностью, мощной корневой системой и, насколько возможно, повышенным значением соотношения зерно : сумма сухого вещества.

Références bibliographiques

ARYA L. M., BLAKE G. R., FARREL D. A., 1975. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots. *Agron. J.* **39,** 424-444.

BOYER J. S., 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf potentials in corn and soybean. *Plant Physiol.*, **46,** 236-239.

GELFI N., 1975. *Influence des conditions d'alimentation hydrique et azotée sur l'efficience de l'eau et la production chez le soja* (variété Amsoy). Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse, nº 315, 80 p.

GELFI N., BLANCHET R., BOSC M., 1976. Influence de l'alimentation hydrique sur la transpiration et la photosynthèse du soja (*Glycine Max.* L. Merril) ; conséquences relatives à l'efficience de l'eau consommée. *C. R. Acad. Sci.* Paris, en cours d'impression.

MEDERSKI M. J., JEFFERS D. L., PETERS D. B., 1973. Water and water relations, in *Soybeans, improvement, production and uses*, B. E. Caldwell ed., Amer. Soc. Agron., Madison, U.S.A., 239-266.

MINGEAU M., 1974. Etude de la sensibilité du soja à la sécheresse. *Inform. techn.* C.E.T.I.O.M., n° 47, 1-14.

OGREN W. L., RINNE R. W., 1973. Photosynthesis and seed metabolism, in *Soybeans, improvement, production and uses*, B. E. Caldwell ed., Amer. Soc. Agron. Madison, U.S.A., 391-416.

PUECH J., LENCREROT P., HERNANDEZ M., 1974. Rôle de quelques facteurs du milieu dans la production qualitative et quantitative du soja. I. Croissance, développement et rendements du soja en culture irriguée ou non. *Ann. agron.*, **25**, 659-679.

PUECH J., BONNAL J. M., HERNANDEZ M., 1976. Influence de la concurrence intraspécifique sur les modalités de la fructufication d'un soja (*Glycine Max*. L. Merril) à floraison de type indéterminé. *C. R. Acad. Sc.* (sous presse).

Station d'Agronomie Toulouse, 1974. Le *soja*, compte rendu des travaux réalisés, 88 p.

SULLIVAN T. P., BRUN W. A., 1975. Effect of root genotype on shoot water relations in soybeans. *Crop Sci.*, **15**, 319-322.

Ann. agron., 1977, **28** (3), 277-289.

Influence de la température du substrat sur la composition des racines et des limbes de tomate. Implications concernant l'absorption hydrique

P. CORNILLON

avec la collaboration technique de Magali AUGÉ

Laboratoire d'Agronomie
Station de Science du Sol, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Au cours d'un essai en serre, nous avons étudié les variations de composition de la racine de tomate sous l'influence de trois températures du substrat : 12 °C, 16 °C et 22 °C. Ces variations de composition peuvent expliquer, en partie, une modification des résistances racinaires à l'absorption de l'eau et des éléments minéraux.

Les observations effectuées montrent l'apparition à 12 °C d'un effet de sécheresse physiologique très accentué qui se traduit par une très nette réduction de l'hydratation des tissus.

La teneur en lipides des racines n'est pratiquement pas modifiée, mais les types d'acides gras rentrant dans leur constitution subissent de forts changements. Ainsi à 12 °C, la synthèse des acides gras insaturés est favorisée avec une élévation notable de la quantité d'acide linolénique et une diminution concomitante du taux d'acide palmitique. A 22 °C, il se produit le phénomène inverse.

Au niveau des limbes, la faible température du substrat provoque une accumulation extraordinaire d'acide myristique et une diminution du pourcentage des acides gras majeurs : acide palmitique, acide linoléique et acide linolénique.

De même, nous notons une teneur marquée en acide 15 méthylhexadécanoïque et 14 méthylhexadécanoïque que de nombreux auteurs considèrent comme étant caractéristique des bactéries.

Parallèlement à ces modifications du métabolisme des acides gras, il apparaît une forte augmentation du pourcentage d'acides aminés libres qui participent à l'accroissement de la viscosité du cytoplasme.

I. — Introduction

L'étude de la température du substrat nous a permis de noter les variations, parfois profondes, que subissent les conditions de croissance de la tomate en cours de culture. On observe aux basses températures une moindre synthèse de matières sèches pendant toute la période végétative en liaison avec une modification de la nutrition minérale et hydrique de la plante. Mais aux faibles températures, la forte réduction des prélèvements en eau par la plante conduit à une sécheresse physiologique qui se traduit par une réduction de l'hydratation des tissus (Cornillon, 1976). Cette action de la température modifie certainement les résistances racinaires à l'absorption de l'eau, ce qui se répercute sur les transferts, qu'il s'agisse de l'absorption active ou de l'absorption passive. Par ailleurs, il a été montré que l'absorption de l'eau, notamment l'absorption active, est sous l'étroite dépendance de l'activité

métabolique de la racine (Morizet et Mingeau, 1976) ; or celle-ci est très sensible à la température.

Parmi les barrières que l'eau en phase liquide rencontre à travers la plante, le frein le plus important se situe au niveau des racines (Kramer, 1956). Aussi la composition de cet organe paraît être un facteur important pour la régulation de la nutrition hydrique du végétal au cours de la croissance et du développement.

Pour apporter des éléments de réponse au problème de l'absorption de l'eau aux basses températures, nous avons étudié les modifications de la composition des racines de tomate en fonction de la température du substrat. Dans ce but, nous avons mis en place, sous serre, dans un milieu ambiant, homogène et rigoureusement contrôlé, une expérimentation en culture hydroponique.

Au cours de cette étude, après avoir précisé les conditions expérimentales, nous présentons les résultats concernant la composition des racines et plus particulièrement celles en acides gras et en acides aminés libres. De plus, nous indiquerons de même les teneurs en acides gras du limbe.

II. — Méthodologie

1. — *Choix des températures du substrat*

Pour obtenir une température uniforme dans le substrat, nous avons utilisé une solution nutritive bien aérée, renouvelée tous les 3 jours pour éviter une variation trop importante de la composition minérale des solutions. L'aération est pratiquée avec un bulle à bulle d'air comprimé.

Les températures retenues, 12 °C, 16 °C et 22 °C, tiennent compte des observations antérieures (Cornillon, 1974).

Dans le même temps, les températures ambiantes ont varié, suivant les essais, entre 13 °C et 18 °C la nuit et 25 °C à 35 °C le jour.

2. — *Conditions de culture*

Le tableau 1 donne la composition ionique de la solution réalisée avec de l'eau déminéralisée et complétée avec des oligo-éléments. La pression osmotique voisine de 0,50 atmosphère était satisfaisante pour une croissance normale des tomates.

TABLEAU 1

Composition de la solution nutritive (meq/l)

	NH_4^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Total
NO_3^-		6	8		14
PO_4H^-	1				1
SO_4^{--}				2	2
Total	1	6	8	2	17

Deux cultures ont été effectuées successivement avec la même variété de tomate hybride (H 63.5) pour éliminer l'effet possible de l'époque de croissance sur la composition lipidique des racines.

A l'automne, après un semis le 6 septembre sur sable quartzeux inerte, les plantes ont levé entre le 12 et le 15 septembre. Le repiquage a été effectué le 25 septembre et la différenciation des températures (12 °C et 22 °C) a eu lieu le 2 octobre. Les prélèvements des systèmes racinaires ont été réalisés le 9e et le 15e jours après la mise en place des traitements.

Pour la culture de printemps, le semis mis en place le 23 janvier a levé entre le 31 janvier et le 3 février. Le repiquage, effectué le 17 février, est suivi par la mise en place des traitements le 19 février avec des températures de racines de 12 °C et 22 °C. Le prélèvement unique de 16 à 32 plantes suivant la température est réalisé le 12 mars pour les racines et les limbes, soit 21 jours après la mise en place de l'essai.

3. — *Extraction et analyse des lipides*

La fixation des racines est réalisée par congélation à — 30 °C immédiatement après prélèvement et lavage.

Etant donné le pourcentage élevé d'acides gras insaturés, nous avons utilisé la méthode de Bligh et Dyer (1959) pour minimiser les oxydations et la production d'artefacts.

Le tissu est traité directement par deux solvants : chloroforme et méthanol dans des proportions telles que le mélange constitue une seule phase avec l'eau (1 v : 2 v : 0,8 v). Les liaisons lipides-protéines sont rompues par le méthanol et les lipides sont solubilisés par le chloroforme. La solution est ensuite diluée par des volumes donnés de chloroforme et d'eau de façon à obtenir un mélange à deux phases : la phase inférieure constituée presque exclusivement de chloroforme contient les lipides en solution et la phase supérieure constituée de méthanol et d'eau contient les impuretés.

Pour obtenir une bonne séparation des acides gras, les lipides sont saponifiés par la potasse en milieu alcoolique. Les acides sont ensuite méthylés et les esters méthyliques analysés par chromatographie en phase gazeuse sur une colonne de carbowax 20 M à 190 °C (J. Flanzy *et al.*, 1975).

Dans les tableaux 3, 4, 5 et 6, nous utilisons les abréviations suivantes pour les principaux acides :

L.E.C.	Longueur Equivalente de Carbone.
C 12 : 0	Acide laurique.
C 14 : 0	Acide myristique.
C 16 : 0	Acide palmitique.
C 16 : 1 ω 7	Acide palmitoléique.
Iso C 17	Acide 15 méthylhexadecanoïque.
Ante iso C 17	Acide 14 méthylhexadecanoïque.
C 18 : 0	Acide stéarique.
C 18 : 1 ω 9	Acide oléique.
C 18 : 2 ω 6	Acide linoléique.
C 18 : 3 ω 3	Acide linolénique.

4. — *Acides aminés libres*

Immédiatement après la récolte des racines, l'échantillon est plongé dans l'alcool à 96 °G.L., en cours d'ébullition, pour obtenir une fixation instantanée du matériel végétal. L'ébullition est poursuivie pendant 5 mn. Après broyage au Sorvall et filtration, le résidu insoluble est repris deux fois avec l'alcool à 80 p. 100 pour obtenir une bonne séparation des formes d'azote organiques solubles et insolubles.

Une fraction de l'extrait hydroalcoolique est fixé à 4 °C sur une résine P 50 pour purifier et dessaler les échantillons. Après rinçage de la colonne avec de l'eau bidistillée, les acides aminés adsorbés sont élués d'abord par l'ammoniaque 2 N et ensuite par l'ammoniaque 4 N. Après élimination de l'éluant, le résidu sec est repris par du tampon citrate de sodium à pH = 2,2.

L'analyse des acides aminés est effectuée sur un analyseur d'acides aminés avec une résine échangeuse de cation (C. Flanzy, 1975).

III. — Résultats

1. — *Composition de la racine*

Le tableau 2 fournit les caractéristiques générales des racines dont la croissance s'est effectuée à 12 °C et 22 °C. Nous retrouvons à 12 °C l'effet de sécheresse physiologique due à la faible température. En effet, à cette température la teneur en eau des racines est presque deux fois plus faible que celle des tissus dont la croissance s'est effectuée à 22 °C, mais les taux d'azote et de glucides sont nettement plus élevés. Par contre, les températures élevées favorisent, dans une certaine mesure, la minéralisation des racines. Seul le pourcentage de lipides ne subit que de très faibles variations ; ceci peut être en relation avec leur rôle et leur abondance dans les membranes de la racine. En effet, la plupart des membranes sont constituées d'environ 40 p. 100 de lipides et de 60 p. 100 de protéines (Lehninger, 1970).

TABLEAU 2

Composition de la racine de tomate

Caractéristiques	12 °C	22 °C
Eau (p. 100 de la matière sèche)	1 197	2 035
(p. 100 de la matière fraîche)	92,3	95,3
Matière sèche (p. 100 de la matière fraîche)	7,70	4,68
Azote organique (p. 100 de la M.S.)	6,27	5,01
Lipides (p. 100 de la M.S.)	2,1	1,9
Glucides (p. 100 de la M.S.)	6,0	2,5
Matières minérales (p. 100 de la M.S.)	0,14	0,19

2. — *Lipides et acides aminés*

2.1. *Variations des proportions des acides gras dans les racines.*

Les acides gras entrant dans la composition des lipides présentent des modifications qualitatives particulièrement importantes en fonction de la température du substrat.

TABLEAU 3

Variations du pourcentage d'acides gras des racines en fonction de la température du substrat (p. 100 du total) (9 jours)

Type d'acide	12 °C	22 °C
C 10 : 0	traces	traces
C 12 : 0	traces	traces
C 14 : 0	0,2	0,2
Iso C 15	0,8	0,7
C 15 : 0	0,2	0,4
LEC 15,24	traces	traces
Iso C 16	traces	traces
C 16 : 0	18,1	24,4
C 16 : 1 ω 7	0,2	0,4
Iso C 17	4,6	3,5
Ante Iso C 17	traces	traces
C 17 : 0	0,1	0,1
Iso C 18	traces	traces
C 18 : 0	1,0	1,5
C 18 : 1 ω 9	1,5	1,2
C 18 : 1 ω 7	0,3	0,2
C 18 : 2 ω 6	52,8	51,3
LEC 19,05	0,6	0,4
C 18 : 3 ω 3	19,1	13,1
C 20 : 0	0,3	0,6
C 20 : 1 ω 9	traces	traces
C 20 : 2 ω 6	traces	traces
C 20 : 4 ω 3	traces	traces
C 22 : 0	0,6	0,9
C 23 : 0	traces	0,5
C 24 : 0	traces	traces

Les tableaux 3, 4, 5 donnent les variations du taux des différents acides gras des racines sous l'action de la température du substrat pour des temps de traitements variables. Ces déterminations correspondent à la culture d'automne, pour les résultats des 2 premiers tableaux, et à la culture de printemps pour le dernier.

Pour les deux températures étudiées et les trois dates de prélèvements, la répartition quantitative des divers constituants donne 3 acides majeurs : l'acide palmitique (C 16 : 0), l'acide linoléique (C 18 : 2 ω 6) et l'acide linolénique (C 18 : 3 ω 3). Ces trois acides contribuent pour 87 à 90 p. 100 du total des 20 acides déterminés, et même le seul acide linoléique représente quantitativement la moitié des acides gras. Parallèlement, trois acides dépassent le seuil de 1 p. 100 : l'acide stéarique (C 18), l'acide oléique (C 18 : 1 ω 9) et l'acide Iso C 17. De plus, toute une série d'acides dont la longueur de la chaîne carbonée varie de 10 carbones à 24 carbones est déterminée mais représente individuellement moins de 1 p. 100 du total des acides gras.

Mais à côté d'une composition globale homogène, il apparaît une très grande différence qualitative et quantitative en fonction de la température du substrat. En effet, si la teneur en acide linoléique reste relativement constante et voisine de 50 p. 100 pour 12 °C, 16 °C et 22 °C, le *comportement des acides palmitique et linolénique est opposé*. Sous l'effet de la faible température, le taux d'acide palmitique diminue

TABLEAU 4

Variations du pourcentage d'acides gras des racines en fonction de la température du substrat (p. 100 du total) (14 jours)

Type d'acide	12 °C	22 °C
C 10 : 0	traces	traces
C 12 : 0	traces	0,1
C 14 : 0	0,1	0,2
Iso C 15	0,8	0,6
C 15 : 0	traces	0,5
LEC 15,24	0,2	0,1
Iso C 16	traces	traces
C 16 : 0	18,2	24,0
C 16 : 1 ω 7	0,3	0,4
Iso C 17	5,6	3,8
Ante Iso C 17	traces	traces
C 17 : 0	traces	0,2
Iso C 18	traces	traces
C 18 : 0	1,1	1,4
C 18 : 1 ω 9	1,3	0,9
C 18 : 1 ω 7	0,4	0,3
C 18 : 2 ω 6	49,1	50,8
LEC 19,09	1,0	0,5
C 18 : 3 ω 3	19,6	12,7
C 20 : 0	0,4	0,6
C 20 : 1 ω 9	traces	traces
C 20 : 2 ω 6	traces	traces
C 20 : 4 ω 3	traces	0,3
C 22 : 0	0,6	0,9
C 23 : 0	0,3	0,7
C 24 : 0	0,7	0,7

tandis que celui de l'acide linolénique augmente. En valeur absolue, ces variations de composition sont très comparables et égales à environ 6 p. 100 du total des acides gras. Ainsi le rapport C 16 : 0/C 18 : 3 ω 3 prend une valeur égale à 1,86 pour les échantillons obtenus à 22 °C et cette valeur diminue jusqu'à 0,94 pour 12 °C.

Quand on analyse le degré de saturation des acides gras, on note que la variation est encore plus grande puisque chaque molécule d'acide saturé est remplacée par une molécule d'acide comportant 3 doubles liaisons. En outre des acides gras à 16 atomes de carbone sont remplacés par des acides à 18 atomes de carbone dans le squelette moléculaire.

Le comportement des acides gras dont l'importance quantitative est secondaire, varie selon le traitement effectué. Le taux d'acide stéarique augmente avec la température du substrat tandis que celui de l'acide oléique et de l'Iso C 17 diminue dans les mêmes conditions. Nous notons au niveau des racines de tomate la très faible importance de l'acide oléique contrairement à son rôle habituel dans de nombreux organes végétaux. Par contre, la teneur en acide Iso C 17 est plus élevée à 12 °C en liaison avec une accumulation marquée de leucine dont ils dérivent (Hitchcock et Nichols, 1971). En effet, la teneur en leucine devient 2,9 fois plus grande à 12 °C qu'à 22 °C. Mais tous les acides aminés libres analysés s'accumulent dans la racine et leur teneur totale passe de 24,5 $\mu M.ml^{-1}$, à 22 °C jusqu'à 95 $\mu M.ml^{-1}$ à 12 °C.

TABLEAU 5

Variations du pourcentage d'acide gras des racines en fonction de la température du substrat (p. 100 du total) (21 jours)

Acide gras	12 °C	16 °C	22 °C
C 10 : 0	traces	traces	traces
C 12 : 0	0,2	0,9	0,7
LEC 13,73 + 13,76	0,1	0,1	traces
C 14 : 0	0,2	0,5	0,5
Iso C 15	0,9	0,7	0,6
C 15 : 0	0,3	0,5	0,5
C 15 : 1 ω 8	traces	0,1	0,1
Iso C 16	traces	traces	traces
C 16 : 0	18,1	21,8	23,6
C 16 : 1 ω 9 et 7	0,2	0,3	0,5
Iso C 17	6,4	4,6	4,0
LEC 16,75	0,1		
C 17 : 0	0,1	0,1	0,2
C 18 : 0	1,2	1,1	1,6
C 18 : 1 ω 9	1,4	1,5	1,2
C 18 : 1 ω 7	0,2	0,4	0,2
C 18 : 2 ω 6	45,9	48,7	50,2
LEC 19,07	1,1	0,7	0,6
C 18 : 3 ω 3	21,6	16,2	13,7
C 20 : 0	0,4	0,3	0,3
C 20 : 2 ω 6	0,1		
C 21 : 0	traces		
C 22 : 0	0,7	0,9	0,7
C 23 : 0	0,2	0,2	0,3
C 24 : 0	0,5	0,3	0,3

TABLEAU 6

Variations de la teneur en acides aminés libres en fonction de la température du substrat (p. 100 du total) (14 jours)

Acides aminés	12 °C	22 °C
Acide aspartique	5,8	5,7
Thréonine	26,2	11,8
Acide glutamique	17,1	25,3
Proline	3,2	4,0
Glycine	2,6	3,2
Alanine	11,3	9,0
Valine	3,2	3,2
Isoleucine	1,4	2,4
Leucine	3,0	4,0
Tyrosine	1,4	1,6
Phenylalanine	1,3	2,9
Acide γ amino butyrique	20,8	22,0
Lysine	1,7	2,9
Histidine	1,1	1,6

2.2. *Composition en acides aminés de la racine.*

Le tableau 6 permet de noter, pour l'expérimentation conduite à l'automne, les variations des teneurs relatives en ce qui concerne les différents acides aminés. Par rapport aux pourcentages mesurés dans les racines maintenues à 22 °C, nous observons à 12 °C des variations souvent très importantes. En effet, seuls les taux d'acide aspartique et de valine ne subissent pas de modifications. La plupart des acides aminés ont une teneur relative beaucoup plus faible à 12 °C par rapport à 22 °C et en particulier la leucine. Par contre, l'alanine et surtout la thréonine s'accumulent à basse température avec un taux particulièrement important pour ce dernier.

2.3. *Les acides gras dans le limbe foliaire.*

Le tableau 7 indique les teneurs en acide gras des limbes de tomates dont les racines étaient placées aux diverses températures : 12 °C, 16 °C et 22 °C. L'analyse

TABLEAU 7

Variations du taux d'acide gras du limbe en fonction de la température du substrat (p. 100 du total) (21 jours)

Acide gras	12 °C	16 °C	22 °C
C 10 : 0	0,5	0,3	1,0
C 12 : 0	2,3	2,9	4,3
LEC 12,91 à 13,65	1,9	3,3	3,9
C 14 : 0	27,2	2,2	3,1
C 14 : 1 ω 9	0,5	0,3	0,3
C 14 : 1 ω 5	traces		0,1
LEC 14,58	0,2	0,5	0,4
C 15 : 0	traces	traces	0,1
LEC 15,26	traces		
Iso C 16	traces		
LEC 15,77	0,2	0,4	0,2
C 16 : 0	13,1	20,9	23,0
LEC 16,77	0,6	1,1	0,9
C 16 : 1 ω 7	0,2	0,2	0,4
Iso C 17	2,5	4,3	4,2
Ante Iso C 17	0,4	0,5	0,5
C 17 : 0	0,1	0,1	0,1
C 17 : 1 ω 7	4,7	3,8	2,4
Iso C 18	0,1	0,2	0,2
C 18 : 0	1,7	2,0	2,5
C 18 : 1 ω 9	2,4	2,6	4,1
C 18 : 1 ω 7	0,4	0,2	0,5
C 18 : 2 ω 6	10,5	15,4	14,1
C 19 : 1 ω 9	0,3	0,5	0,4
C 18 : 3 ω 3	27,3	35,5	30,7
LEC 19,38	0,2	0,2	
19,88	0,2	0,3	0,4
C 20 : 0	0,2	0,4	0,4
C 20 : 1 ω 11	0,2		
LEC 20,28	0,3		
LEC 20,38	1,6	1,0	0,5
C 20 : 2 ω 6	traces	traces	traces
C 20 : 3 ω 6	0,1		0,3
LEC 21, 36 à 22,41		0,4	0,6

des résultats permet de voir que la composition du limbe et celle des racines présentent des écarts sensibles de composition en acides gras. Ainsi l'acide linoléique représente environ 50 p. 100 des acides gras dans les racines et moins de 15 p. 100 dans le limbe. Par contre, l'acide linolénique devient l'acide majeur du limbe, mais l'acide palmitique présente dans ces deux organes la même importance.

En outre, le nombre d'acides gras du limbe est beaucoup plus important avec l'apparition marquée du C 14 : 1 ω 9, l'ante Iso C 17, le C 17 : 1 ω 7, le C 19 : 1 ω 9 et le C 20 : 1 ω 11.

Nous notons dans le limbe de la tomate la présence d'acides iso et ante iso que de nombreux auteurs considèrent comme caractéristique des bactéries (Hitchcock et Nichols, 1971).

L'abaissement de la température du substrat se traduit d'abord par une forte diminution du taux de l'acide palmitique, de l'acide linoléique et de l'acide linolénique et surtout par une accumulation extraordinaire d'acide myristique. En effet, ce dernier acide, C 14 : 0, s'accumule environ dix fois plus dans le limbe des plantes dont les racines sont maintenues à 12 °C par rapport aux traitements 16 °C et 22 °C. Comme Mazliak (1968) l'a noté, la diminution de l'activité photosynthétique de la plante s'accompagne d'une moindre synthèse d'acide linolénique.

Ces différences dans la composition et le comportement des racines et des limbes peuvent s'expliquer dans la mesure où le métabolisme des acides gras est indépendant pour chaque organe. L'absence de système transporteur de lipides d'un point à un autre de la plante peut conduire à un comportement particulièrement différent des acides gras dans les divers organes.

IV. — Discussion

Apparemment, le métabolisme des lipides au niveau des racines est modifié quand la température du substrat se situe au-dessous d'un certain niveau qui semble compris entre 16 °C et 12 °C pour notre deuxième expérience (tableau 5).

L'accumulation d'acide gras tri insaturé à plus grande longueur de chaîne carbonée dans les racines de la tomate peut jouer un rôle dans les variations de perméabilité au niveau des racines. Ainsi Lehninger (1970) suggère une variation de perméabilité de la membrane en fonction du rapport des différents lipides qui entrent dans sa constitution. Pour Haest *et al.* (1969) également, la perméabilité de la membrane peut être déterminée par sa composition lipidique. Mais la composition d'une membrane donnée est très constante et caractérisée par un rapport fixe entre les différents lipides : phospho-lipide, glyco-lipides, qui apparaît défini génétiquement. Ceci suggère que les propriétés physiques de ces membranes lipidiques, déterminées par les caractéristiques de la composition chimique, sont essentielles pour leur fonctionnement. Cependant, les rapports entre les différents acides gras entrant dans la composition de chaque membrane ne sont pas fixés ; ils peuvent varier selon les conditions extérieures et, en particulier, avec la température du milieu. Ces observations sont en accord avec de nombreux travaux qui notent une accumulation d'acides gras insaturés sous l'effet des faibles températures (Patterson, 1970 ; Harris et James, 1969 ; Gerloff *et al.*, 1966 ; Grenier *et al.*, 1973).

L'influence du froid sur la synthèse des acides gras des membranes a été étudiée par différents auteurs (Lyons *et al.*, 1964 ; Gerloff *et al.*, 1966 ; Harris et James, 1969 ;

Grenier *et al.*, 1973). Lyons *et al.* (1964) ont montré que la membrane des mitochondries d'espèces résistant au gel contient un pourcentage beaucoup plus élevé d'acide gras insaturé que les variétés sensibles. De même, Gerloff *et al.* (1966) travaillant sur des racines de luzerne ont mis en évidence une augmentation de la teneur en acides gras insaturés sous l'effet du froid et plus spécialement des acides linoléique et linolénique. Récemment, Grenier *et al.* (1973) ont montré sur racine de luzerne que l'incorporation d'acétate ^{14}C dans l'acide linoléique est très faible à 22 °C et devient importante à 1 °C.

Cette importante modification dans la composition en acides gras de la racine peut expliquer des variations de prélèvement en eau par les racines à faible température. En effet, les faibles températures provoquent une variation de composition des acides gras qui conditionne une acclimatation des plantes au froid. Cet enrichissement des racines en acides gras insaturés, dont le point de fusion est beaucoup plus faible, permet aux tissus végétaux de garder une plus grande élasticité. Mais cette variation de composition peut se traduire par une réduction des prélèvements d'eau par la plante, même si les conditions atmosphériques sont favorables pour une forte transpiration.

Une deuxième hypothèse permet d'expliquer les variations de résistance au transfert de l'eau à travers les racines par une action directe de la température sur les propriétés physiques de ses constituants et plus particulièrement les lipides. Les modifications de composition en acides gras de la racine permettraient d'atténuer les effets néfastes de la température.

L'accumulation d'acide myristique dans le limbe peut s'expliquer par la position de cet acide dans la chaîne de synthèse des acides gras saturés et insaturés. En effet, la désaturation en présence d'oxygène peut se produire à partir de l'acide myristique qui sert de précurseur aux acides insaturés à nombres de carbone plus élevé (Hitchcock et Nichols, 1971). Dans notre essai, nous notons, parallèlement à cette accumulation d'acide myristique, une moindre synthèse de nombreux acides gras insaturés : acides linoléique et linolénique et aussi, dans une moindre mesure, l'acide oléique.

Nous avons noté non seulement une modification de la composition lipidique mais aussi une accumulation importante d'acides aminés libres, ce qui montre une action complexe des basses températures sur le métabolisme intermédiaire.

Le pourcentage d'accumulation des acides aminés, sous l'effet de la plus basse température, n'est pas en relation avec le type de radical : non polaire, polaire mais non chargé, chargé positivement ou chargé négativement dans la zone de pH intra-cellulaire (pH 6,0-7,0). De même, cette accumulation n'est pas liée aux familles d'acides aminés définies dans le cas des levures (Moat et Ahmad, 1965).

Au niveau des racines, la synthèse des acides aminés ne semble pas être un facteur limitant de la croissance aux faibles températures et l'accumulation de certains acides aminés doit être en rapport avec leur position dans les voies métaboliques et avec la croissance moindre des plantes.

De nombreux auteurs ont déjà noté une modification du métabolisme azoté sous l'effet des basses températures. Ainsi l'acclimatation au froid s'accompagne d'un accroissement du taux de protéines solubles et de protéines liées aux membranes dans le cas du Buis (Gusta et Weiser, 1972). De même, Gerloff *et al.* (1967) notent un

relèvement du taux de protéines solubles des racines de luzerne au cours de l'endurcissement au froid de diverses variétés.

Mais l'augmentation du taux d'acides aminés à 12 °C conduit à un accroissement de la viscosité du cytoplasme et en conséquence peut réduire la vitesse du transfert de l'eau dans la plante. En effet, Bohning et Lusanandana (1952) ont mis en évidence un parallélisme étroit entre la diminution de consommation en eau de la plante et l'augmentation de viscosité du cytoplasme.

V. — Conclusion

L'étude que nous avons réalisée en serre dans des conditions expérimentales contrôlées, permet d'effectuer diverses observations sur les réactions du végétal aux variations de la température des racines entre 12 °C et 22 °C. Ainsi, la composition des racines en acides aminés et en acides gras est précisée sur un matériel végétal élevé dans des conditions standard.

Les différences d'absorption d'eau, observées antérieurement, peuvent s'expliquer par une modification de la structure des racines et plus particulièrement par celle de la constitution chimique. Ainsi les formes d'azote et les types d'acide gras de la racine sont modifiés quantitativement par l'abaissement de la température au-dessous d'un certain seuil. A 12 °C, les divers acides aminés s'accumulent dans la racine après quelques jours de croissance. De même, il apparaît un accroissement du pourcentage d'acide linolénique et une réduction comparable de la teneur en acide palmitique. La modification du rapport entre ces deux acides se traduit par un relèvement du taux d'insaturation des acides gras de la racine.

Cette dernière observation paraît particulièrement intéressante comme critère d'adaptation de la plante aux basses températures du substrat. Elle permet d'envisager une extension de l'aire de culture de certains types de plantes et la mise en place de cultures à contre saison pour d'autres espèces. Aussi, devons-nous élargir les bases de ce travail pour essayer de préciser les relations entre type d'acide gras et absorption de l'eau pour différentes espèces et variétés. Ultérieurement, il est possible d'envisager l'utilisation des déterminations d'acides gras comme critère de sélection en génétique.

De même, l'utilisation de substrats artificiels et le chauffage des serres par le sol ne manqueront pas de soulever des problèmes de croissance et de développement nouveaux.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

L'auteur tient à exprimer les plus vifs remerciements au personnel du laboratoire de nutrition du C. N.R.Z. (I.N.R.A., Jouy-en-Josas) et plus particulièrement à M. J. Flanzy, qui ont réalisé les déterminations d'acides gras sur lesquelles est basée cette étude.

Summary

Influence of soil temperature on the composition of tomato roots and leaf blades. Consequences for water absorption

In a greenhouse experiment we studied the composition variations of tomato roots under the influence of three soil temperatures : 12 °C, 16 °C, and 22 °C. These variations in composition can partially explain a modification of the root resistance to water and mineral element absorption.

At 12 °C the observations showed the apparition of a very marked physiological drought effect expressed by a very clear reduction of tissue hydration.

The lipid content of the roots is almost unchanged, but their fatty acids are subject to important alterations.

Thus, at 12 °C the synthesis of unsaturated fatty acids is favored with a great elevation of the linolenic acid quantity and a concomitant decrease of the palmitic acid rate. At 22 °C the opposite phenomenon occurs.

As for the leaf blades, the low soil temperature provokes an extraordinary accumulation of miristic acid and a decrease of the most important fatty acids : palmitic acid, linoleic acid and linolenic acid.

We also observed a marked content of 15 methylhexadecanic and 14 methylhexadecanic acid, which many authors consider characteristic of bacteria.

Concomitant with these modifications of the fatty acid metabolism appears a major increase of he percentage of free aminoacids which contribute to the increase of cytoplasma viscosity.

Zusammenfassung

Auswirkung der Substrattemperatur auf die Zusammensetzung der Wurzeln un Blattspreinten der Tomate. Einfluss auf die Wasserabsorbierung

Im Verlaufe eines Versuchs im Gewächshaus haben wir untersucht, wie verschieden die Zusammensetzung der Tomatenwurzeln unter dem Einfluss von drei Substrattemperaturen (12 °C, 16 °C und 22 °C) ausfällt.

Diese Abweichungen in der Zusammensetzung können zum Teil eine Erklärung dafür sein, dass der Widerstand der Wurzeln gegenüber der Absorbierung von Wasser und mineralischen Elementen modifiziert wird.

Nach diesen Beobachtungen tritt bei 12 °C ein sehr ausgeprägter Effekt physiologischer Trockenheit in Erscheinung, der in einer sehr deutlichen Verminderung der Gewebehydration zum Ausdruck kommt.

Der Gehalt an Lipiden in den Wurzeln verändert sich praktisch nicht, aber die im Aufbau enthaltenen Fettsäuren erfahren starke Veränderungen. So findet bei 12 °C bevorzugterweise die Synthese ungesättigter Fettsäuren statt, wobei sich die Menge der Linolensäuren erheblich erhöht und der Gehalt an Palmitinsäure gleichzeitig abnimmt. Bei 22 °C tritt das ungekehrte Verhältnis in Erscheinung.

Was die Blattspreiten betrifft, so ruft die niedere Substrat-temperatur eine ausserordentliche Anhäufung von Myristinsäure hervor sowie eine Verringerung des Prozentsatzes der wichtigsten Fettsäuren : Palmitinsäure, Linolsäure und Linolensäure.

Remerkenswert ist ebenfalls der beachtliche Gehalt an 15 methylhexadecanischer und 14 methylhexadecanischer Säure, was viele Autoren als Kennzeichen für Bakterien betrachten.

Paralled zu diesen Veränderungen im Metabolismus der Fettsäuren tritt eine starke Erhöhung des Prozentsatzes an freien Aminosäuren auf, die dazu beitragen, die Zähflüssigkeit des Zytoplasmas zu erhöhen.

РЕЗЮМЕ

Влияние температуры субстрата на состав корней и листовых пластинок томата. Участие поглощения влаги.

П. КОРНИЙОН.

В тепличном опыте изучались изменения состава корня растений томата под влиянием трех температур субстрата : 12° Ц, 16° Ц и 22° Ц. Изменения корневой устойчивости к поглощению воды и минеральных элементов частично об'ясняются различиями состава корней.

Наблюдениями отмечено, при температуре в 12° Ц, появление сильного эффекта физиологического высыхания, которое выражается явным уменьшением оводнения тканей.

Содержание липидов в корнях практически не изменяется, но типы жирных кислот, входящих в состав этих липидов, меняются очень сильно. Так, например, температура в 12° Ц фаворизирует синтез ненасыщенных жирных кислот и наблюдается заметное увеличение количества линоленовой кислоты, сопровождающееся одновременным уменьшением процентного содержания пальмитиновой кислоты. При температуре субстрата в 22° Ц наблюдается обратное явление.

На уровне листовых пластинок низкая температура субстрата вызывает необычайное накопление миристиновой кислоты и уменьшение процентного содержания главных жирных кислот : пальмитиновой, линолевой и линоленовой.

Отмечается также повышение содержания 15 метилгексадекановой и 14 метилгексадекановой кислот, рассматривающихся многими авторами как кислоты характерные для бактерий.

Параллельно этим изменениям метаболизма жирных кислот, отмечается сильное увеличение процента свободных амино-кислот, принимающих участие в увеличении вязкости цитоплазмы.

Références bibliographiques

BLIGH E. G., DYER W. J., 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canad. J. Biochem. Physiol.*, **37** (8), 911-917.

BOHNING R. H., LUSANANDANA B., 1952. A comparative study of gradual and abrupt changes in root temperature on water absorption. *Plant Physiol.*, **27,** 475-488.

CORNILLON P., 1974. Comportement de la tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.* **25** (5), 753-777.

CORNILLON P., 1976. *Contribution à l'étude des effets de la température des racines sur la croissance et le développement de la tomate. Aspects particuliers de la nutrition hydrique.* Thèse, 3e cycle. U.E.R. Marseille-Luminy.

FLANZY C., 1975. Communication personnelle.

FLANZY J., BOUDON M., LEGER C., PIHET J., 1975. Application of carbowax 20 M as an open tubular liquid phase in analysis of nutritionally important fats and oils. *J. Chromatogr. Sci.* spécial n°.

GERLOFF E. D., RICHARDSON T., STAHMANN M. A., 1966. Changes in fatty acids of Alfalfa roots during cold hardening. *Plant Physiol.* **41,** 1280-1284.

GERLOFF E. D., STAHMANN M. A., SMITH D., 1967. Soluble proteins in Alfalfa roots as related to cold hardiness. *Plant Physiol.* **42,** 895-899.

GRENIER G., MAZLIAK P., TRÉMOLIÈRES A., 1973. Influence du froid sur la synthèse des acides gras dans les racines de deux variétés de luzerne, l'une résistante et l'autre moins résistante au froid. *Physiol. Vég.* **11** (2), 253-265.

GUSTA L. V., WEISER C. J., 1972. Nucleic acid and protein changes in relation to cold acclimation and freezing injury of korean boxwood leaves. *Plant Physiol.* **48**, 91-96.

HARRIS P., JAMES A. T., 1969. The effect of low temperature on fatty acid biosynthesis in plants. *Biochem. J.* **112,** 325-330.

HAEST C. W. M., DE GIER J., VAN DEENEN L. L. M., 1969. Changes in the chemical and the barrier properties of the membrane lipids of E. Coli by variation of the temperature of growth. *Chem. Phys. Lipids* **3,** 413-417.

HITCHCOCK C., NICHOLS B. W., 1971. *Plant lipid biochemistry.* Academic Press, London and New York.

KRAMER P. J., 1956. *Physical and physiological aspects of water absorption.* Encycl. Plant. Physiol., 3, 124-129, Springer Verlag, Berlin.

LEHNINGER A. L., 1971. *Biochemistry*, p. 189-214 et 513-537. Worth publishers inc. New-York.

LYONS J. M., WHEATON T. A., PRATT H. K. 1964. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plants. *Plant Physiol.*, **39,** 262-268.

MAZLIAK P., 1968. *Le métabolisme des lipides dans les plantes supérieures.* Masson et Cie, Paris.

MOAT A. G., AHMAD F., 1965. Biosynthesis and inter relationships of amino acids in yeast. *Wallenstein Communication* 28, **96,** 111-131.

MORIZET J., MINGEAU M., 1976. Influence des facteurs du milieu sur l'absorption hydrique. Etude effectuée sur tomate décapitée en exsudation. II. Facteurs physiques et interactions avec la nutrition minérale. *Ann. agron.* **27** (3), 333-342.

PATTERSON G. W., 1970. Effect of culture temperature on fatty acid composition of chlorella sorokiniana. *Lipids* 5, 597-600.

Ann. agron. 1977, **28** (3), 291-312.

Sur l'épuration par le sol d'eaux résiduaires chargées en alcalilignine

P. KAISER

avec la collaboration technique de M. H. MOUSSIN et M. JOLIVET

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Microbiologie,
Institut National Agronomique Paris-Grignon, 16, rue Claude-Bernard,
75231 *Paris Cedex* 05

Résumé

Au cours d'une recherche sur l'épuration par infiltration dans le sol d'eaux chargées en alcalilignine, nous avons étudié l'écologie et la nutrition des bactéries vivant dans les eaux et déterminé les caractéristiques physico-chimiques des lignines. Les résultats obtenus font ressortir les faits suivants:

1) L'addition de diverses fractions de liqueur noire à l'alios des Landes provoque des dégagements de CO_2 variés. L'adjonction d'une fraction contenant de l'alcalilignine purifiée provoque un dégagement de CO_2 3 à 4 fois moins important que celui de la liqueur noire brute.

2) Durant l'incubation des eaux au laboratoire, les bactéries se multiplient de 4 à 800 fois.

3) Sur milieu à base de liqueur noire, seules se développent des bactéries provenant d'eaux très chargées en alcalilignine. Ces bactéries nécessitent des acides aminés pour leur croissance. Les eaux chargées en lignine contiennent en abondance des bactéries qui sont bien adaptées à ce type de milieu.

4) Dans les eaux récoltées dans les différents puits, une bonne partie des bactéries métabolisent les phénols.

5) Les phénoloxydases sont représentées dans presque tous les échantillons d'eaux, mais leur quantité n'est pas proportionnelle à celle des phénols ou des alcalilignines. L'activité de ces enzymes est liée à la matière organique de l'eau et non aux cellules microbiennes.

6) En culture pure, au laboratoire, les bactéries isolées des eaux dégradent peu de lignine. Sur 36 souches, 22 ne la dégradent pas et 13 souches dégradent entre 1 et 11 p. 100 de lignine. En présence d'asparagine et avec certaines bactéries (18 souches sur 27), le taux d'azote de la lignine extraite après la culture augmente de 9 fois. L'alcalilignine ainsi enrichie en azote devrait pouvoir servir d'amendement en agriculture. Il s'agit d'une hypothèse.

7) La quantité de lignine diminue avec l'augmentation de la distance du point d'épandage. Il y a donc épuration progressive de cette substance. Lors de l'épandage d'une solution très concentrée en alcalilignine, celle-ci migre assez loin du point d'épandage. Le pH des eaux est directement proportionnel à la teneur en lignine. L'analyse des sables à différentes profondeurs montre que l'accumulation de lignine ne se produit à aucun niveau.

La quantité de phénols libres diminue au fur et à mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle varie en fonction de la quantité d'alcalilignine des eaux.

8) La constitution des lignines des eaux a été analysée par la teneur en groupes méthoxyls et par les spectres dans l'infrarouge. Au fur et à mesure de leur épuration, les lignines perdent leur groupe méthoxyl. Les spectres infrarouges révèlent qu'au cours de son infiltration dans le sol, l'alcalilignine subit une dégradation de structure mais acquiert un enrichissement en fonctions nouvelles.

I. — Introduction

Pendant plus de 10 ans, l'usine « La Cellulose du Pin » (Gironde) a déversé ses eaux de lavage contenant des quantités modérées d'alcalilignine (2-3 g/l) dans deux bassins de 1 ha creusés dans le sol. L'eau s'infiltre dans les couches de sable des Landes.

Marchand (1971-1972) a démontré qu'après passage à travers le sol, l'eau rejoint la nappe phréatique complètement épurée.

L'épuration s'effectue par voie physique : adsorption des alcalis sur l'humus du sol, et par voie microbiologique : dégradation de la lignine.

A l'automne 1971, les deux bassins ont servi à recueillir des liqueurs noires très chargées en alcalilignine (jusqu'à 120 g/l), les eaux de lavage peu concentrées étant désormais évacuées vers l'océan.

Des puits permettent de prélever les eaux tout au long de leur migration dans le sol à différentes distances du point d'épandage (tabl. 1, fig. 1).

TABLEAU 1

Distance en m du bassin d'épandage et profondeur des différents puits étudiés

Puits n°	7	18	7 B	7 D	7 E	3 B	3 C	3 D	5 D	4 E
Distance en m du bassin d'épandage	20	40	180	340	420	180	260	340	340	420
Profondeur m	3	10	7	7	7	7	7	7	7	7

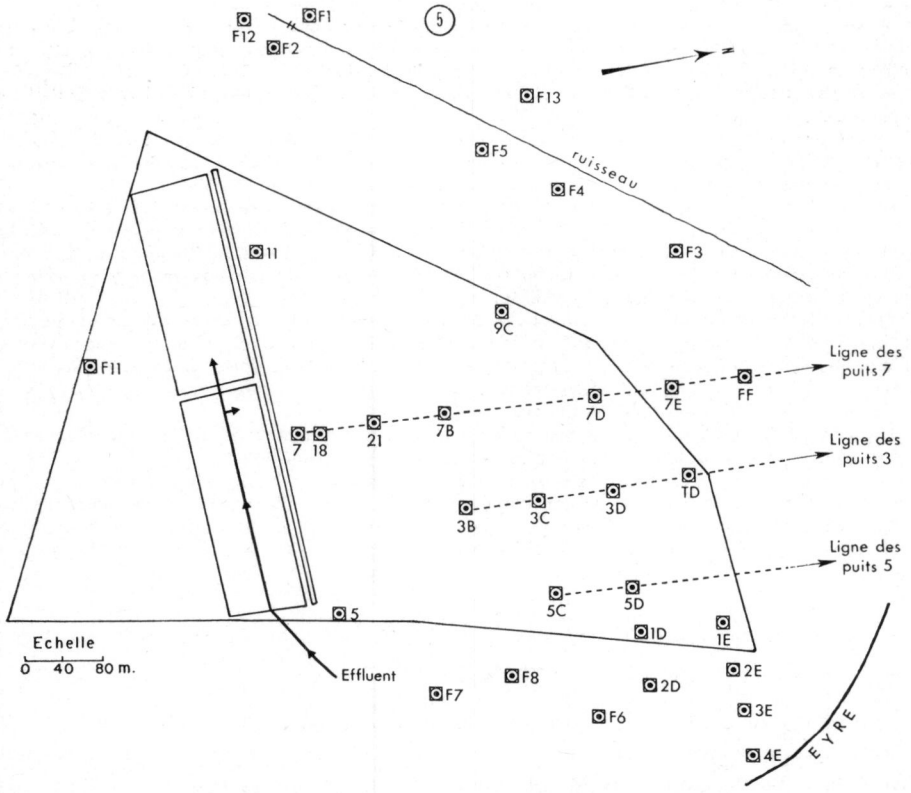


FIG. 1. — *Dispositif d'épandage* (Marchand, 1971).

Nous déterminerons les caractéristiques physicochimiques des échantillons d'eaux et de sol ; nous étudierons l'écologie et les besoins en azote des bactéries qui s'y trouvent.

II. — Matériel et méthodes

2.1. — *L'alcalilignine.*

Le traitement du bois par une solution de soude et de sulfure de sodium à chaud et sous pression solubilise les lignines et permet de récupérer les fibres de cellulose. Les liqueurs noires provenant de ce traitement contiennent des lignines partiellement dégradées, brunes, solubles dans les alcalis et insolubles dans les acides, appelées alcalilignines.

2.2. — *Dégagement du CO_2 par les sables*

Les deux types de sables utilisés ont été prélevés dans les horizons illuviaux B_1 et B_2 d'un sol podzolique proche du bassin d'épandage. Les deux horizons B_1 et B_2 sont nommés couramment alios noir et alios jaune. Le premier, de couleur gris foncé, accumule des matières humiques et le second, de couleur ocre, des sels de fer. L'alios noir renferme 0,037 p. 100 d'azote et 0,73 p. 100 de carbone, d'où un rapport C/N de 19,7. L'alios jaune contient 0,074 p. 100 d'azote et 0,79 p. 100 de carbone, d'où un rapport C/N de 10,6.

20 g d'alios sont additionnés de 7 ml de liqueur noire de pH 10,3 et à 30 g/l d'alcalilignine ou d'une solution d'alcalilignine purifiée de pH 10 ou de « surnageant » (liquide obtenu après l'élimination de l'alcalilignine et alcalinisé à pH 11). Après l'addition des différentes solutions, l'alios jaune a un pH de 8, l'alios noir un pH de 10,5. La méthode de dosage du CO_2 est celle de Pochon et Tardieux (1962).

2.3. — *Milieux de culture*

Milieu « général ».

— Solution de Winogradski	50 ml
— Extrait de terre	50 ml
— Solution d'oligoéléments	2 ml
— Extraits de levure	0,1 g
— Asparagine	0,5 g
— Mannitol	2,0 g
— Gélose	15,0 g
— Eau distillée	1 l.

Milieu pour la recherche des bactéries métabolisant les phénols.

— Milieu de Catroux et collaborateurs (1969).

Milieu à base de liqueur noire.

— Liqueur noire à 30 g/l d'alcalilignine	15 ml/tube
— Gélose à 30 g/l	15 ml/tube.

Mélanger les deux tubes et couler en boîte de Pétri.

Milieux liquides à base d'alcalilignine purifiée.

— Asparagine ou nitrate d'ammonium	3 g	
— Glutamate de Na	1 g	
— Extrait de levure	0,5 g	
— Extrait de terre	50 ml	
— Phosphate monopotassique	1,2 g	
— Phosphate disodique	8,6 g	
— Sulfate de magnésium	0,5 g	
— Solution d'oligoéléments	2 ml	
— Glucose	3 g	ajoutés après l'autoclavage sous forme de solutions stériles
— Alcalilignine purifiée	1 g	
— Eau distillée	1 l	

Les souches pures de bactéries sont cultivées sur ce milieu pendant 4 semaines, avec agitation.

2.4. — *Dosage des phénoloxydases*

Deux substrats ont été choisis :

— Le pyrogallol dont l'oxydation indique la présence d'enzyme du type tyrosinase ou phénoloxydase simple ;

— L'hydroquinone dont l'oxydation est spécifique des polyphénoloxydases ou des laccases. Les deux enzymes oxydent les phénols en quinones qui se polymérisent en substances brunes du type des acides humiques. La polyphénoloxydase participerait à la dégradation de la lignine.

2.4.1. *Méthode colorimétrique.*

Selon Trojanowski et Leonowicz (1971).

Mélanges :

— *Témoin* { 10 ml d'échantillon d'eau neutralisée,
10 ml de tampon acétate pH 6 0,2 N,
1 ml d'hydroxylamine à 1,67 p. 100.

— *Essai* { 10 ml d'échantillon d'eau neutralisée,
10 ml de tampon acétate pH6 0,2 N additionné de 1 p. 100 d'hydroquinone ou de 1 p. 100 de pyrogallol,
1 ml d'hydroxylamine à 1,67 p. 100.

Lecture de l'essai comparé au témoin, au spectrophotomètre, à 430 mμ.

2.4.2. *Méthode respirométrique de Warburg.*

On utilise des fioles de Warburg de 32 ml. On ajoute, au centre, 5 ml d'eau neutralisée et 1 ml d'hydroxylamine à 0,16 p. 100 et, dans le bras latéral, 1,5 ml de tampon acétate 1 M à pH 6 additionné de 1 p. 100 de pyrogallol ou d'hydroquinone. Après 14 mn d'agitation, on mélange les deux solutions et on mesure la consommation d'oxygène durant 150 mn.

2.5. — *Caractéristiques physicochimiques*

Phénols libres.

100 ml d'eau débarrassée d'alcalilignine sont analysés suivant la méthode colorimétrique à l'aminoantipyrine de Taras et coll. (1971).

Dosage de l'alcalilignine.

Il s'effectue par deux méthodes :

Méthode gravimétrique : précipitation de l'alcalilignine par l'acide sulfurique au 1/5, séchage et pesée.

Méthode au permanganate utilisée pour les acides humiques (Pochon et Tardieux, 1962) : 100 p. 100 de la lignine résiduelle sont dosés. Elle est plus précise que la méthode gravimétrique qui surestime le taux d'alcalilignine dans les échantillons d'eau pauvres en alcalilignine (au-dessous de 1 g/l).

Dosage des groupes méthoxyls.

On utilise la méthode de Viedöck et Schwappach selon Zeisel (Brauns, 1952).

Spectres infrarouges.

Les échantillons d'alcalilignine ou d'eau des puits sont traités à l'acide sulfurique. On recueille par centrifugation les lignines précipitées. On les dissout à nouveau dans NaOH N/10 puis on les lyophilise. Les échantillons de lignine lyophilisés sont incorporés à raison de 0,5 à 1 mg dans les pastilles de KBr. Les spectres infrarouges sont déterminés au spectrophotomètre infrarouge Unicam.

III. — Résultats et discussion

3.1. *Dégagement du CO_2 par les sables de l'alios additionnés de diverses fractions de liqueur noire*

Les sables seuls ne dégagent pratiquement pas de CO_2. L'adjonction de diverses fractions de liqueur noire donne les résultats reproduits dans la figure 2 et résumés dans le tableau 2. L'adjonction de liqueur noire aux deux échantillons d'alios produit

TABLEAU 2

Dégagement du CO_2 par les sables additionnés de diverses fractions de liqueur noire

Sables traitements	mg de CO_2/100 g de sable sec en 77 jours
Alios jaune + liqueur noire	333
Alios jaune + « surnageant »	155
Alios jaune + alcalilignine purifiée ..	81
Alios noir + liqueur noire	329
Alios noir + « surnageant »	198
Alios noir + alcalilignine purifiée	100

un fort dégagement de CO_2. Par contre, l'adjonction d'alcalilignine purifiée provoque un dégagement 3 à 4 fois moins important. Avec le « surnageant » dépourvu d'alcalilignine, la quantité de CO_2 dégagée est presque le double qu'avec l'alcalilignine purifiée.

Ces expériences montrent que la minéralisation affecte surtout les molécules autres que l'alcalilignine parmi celles contenues dans le surnageant. D'après notre hypothèse, il s'agirait de petites molécules du type des phénols. En ajoutant de la liqueur noire au sable, on peut donc s'attendre à voir disparaître lentement les alcalilignines et beaucoup plus vite les autres molécules.

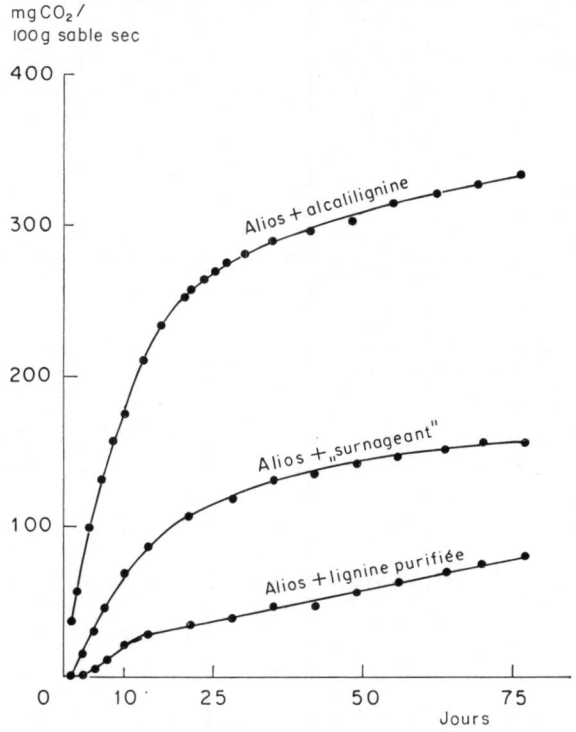


FIG. 2. — *Dégagement cumulé de CO_2 par l'alios jaune additionné de diverses fractions de lignine.*

3.2. *Etude écologique et nutritionnelle des bactéries présentes dans les échantillons d'eau.*

Réception des échantillons. Incubation.

Les échantillons d'eau en provenance de Bordeaux subissent un voyage de 6 jours avant l'analyse au laboratoire. Pendant ce temps, de sérieuses modifications risquent de se produire dans le nombre des bactéries. En effet, celui-ci est totalement différent au moment de la réception et après incubation dans différentes conditions (températures variées, agitation ou non) ; il augmente nettement (de 4 à 800 fois) dans tous les échantillons (tabl. 3). D'autre part, au moment de la réception, nous avons trouvé des nombres de bactéries supérieurs à ceux de Marchand (1971) qui a analysé des eaux fraîchement prélevées. On peut donc affirmer que, pendant le voyage de 6 jours, les bactéries se multiplient dans les échantillons d'eau.

TABLEAU 3

Epreuve d'incubation des eaux du 1er juin 73, nombre de germes/ml $\times 10^6$

	A la réception	+ 11 jours de réfrigérateur à + 10 °C	+ 8 jours de réfrigérateur + 9 jours d'agitation à 28 °C
Bassin	—	—	—
7	3,9	6,5	14,5
7 C	1,2	11,0	37,0
7 D	0,02	0,6	17,0
	0,027	1,2	22
	10	—	140
3 B.....	—	0,9	12
	5	—	19
3 C	1,4	8,2	33,5
3 D	1,8	3,0	20
5 D	2,3	3,7	36

Répartition des bactéries et besoins nutritionnels.

Dans le milieu à base de liqueur noire, seules se développent des bactéries déjà accoutumées à la liqueur noire à forte concentration d'alcalilignine, c'est-à-dire les bactéries du bassin de décantation où la teneur en alcalilignine est élevée (tabl. 4).

TABLEAU 4

Nombre de germes/ml $\times 10^6$ *sur milieu « général » et sur milieu à base de liqueur noire*

	Milieu général	Milieu liqueur noire	Milieu général	Milieu liqueur noire
	Dates			
Eaux	Déc. 1971	Déc. 1971	Juin 1972	Juin 1972
Bassin	19,5	32,5	0,40	0,95
7	61,0	0,15	0,35	< 0,10
18	73,5	10,0	0,05	< 0,10
7 B	19,5	0,35	16,0	< 0,10
7 C	23,5	0,45	2,3	< 0,10
7 D.....	29,5	< 0,10	—	—
7 E	217,0	11,8	—	—
3 B	—	—	0,05	0,10
3 C	—	—	3,5	< 0,10
3 D.....	—	—	3,5	< 0,10
5 D.....	—	—	—	—

L'analyse effectuée en juin 1972 est révélatrice à cet égard. Ces bactéries « adaptées » se développent mieux sur milieu à base de liqueur noire que sur milieu « général ». De plus, elles nécessitent un complexe d'acides aminés pour leur nutrition (fig. 3) tandis que les bactéries des autres échantillons croissent bien avec du chlorure d'am-

monium. Enfin, les bactéries provenant du bassin chargé en lignine ne peuvent être diluées que dans l'eau enrichie en sulfate de sodium. Elles éclatent si on se sert d'eau distillée pour effectuer les dilutions.

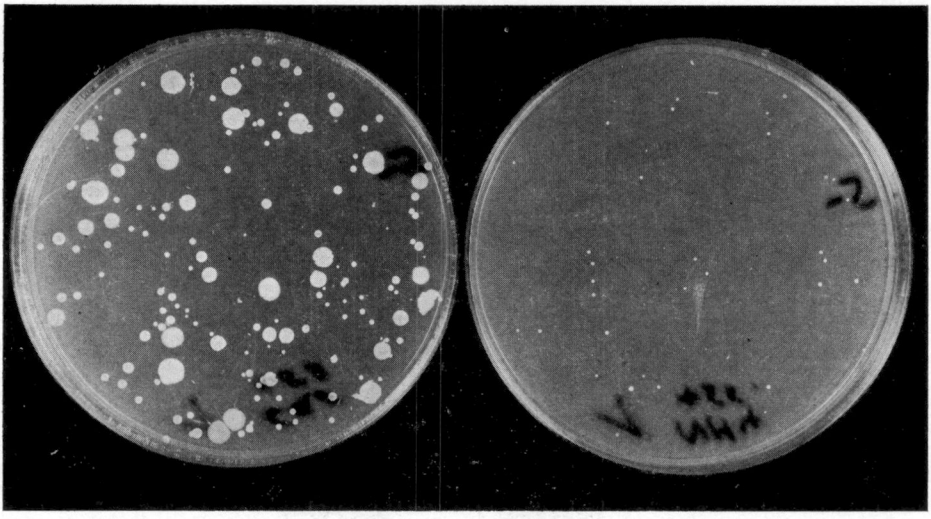


FIG. 3. — *Culture d'une dilution au* 1/100 *de l'eau du bassin prélevée en décembre* 1971, *sur milieu gélosé. A gauche, colonies sur milieu à l'asparagine ; à droite, colonies sur milieu au chlorure d'ammonium.*

Il faut noter que le milieu à base de liqueur noire est légèrement opalescent. Or, les colonies isolées du bassin de décantation produisent autour d'elles un halo d'éclaircissement (fig. 4). Nous avons d'abord pensé à la ligninolyse mais il n'en est rien : ces souches ne dégradent pas la lignine. L'opalescence du milieu serait due, soit à des hémicelluloses, soit à des résines, et les halos d'éclaircissement seraient alors des halos de digestion de la résine ou de l'hémicellulose.

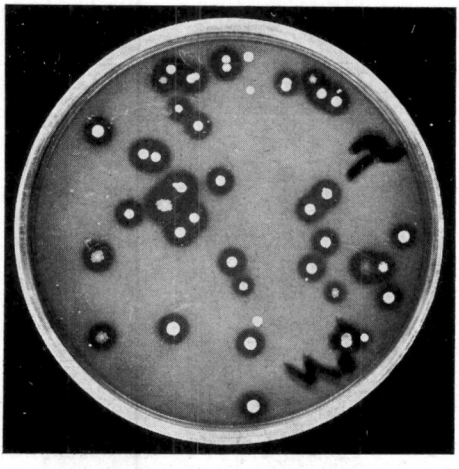


FIG. 4. — *Culture d'une dilution au* 1/1000 *de l'eau du bassin sur milieu gélosé à base d'alcalilignine. Notez les halos d'éclaircissement autour des colonies (qui ne sont pas dûs à la ligninolyse).*

Nous remarquerons aussi que le nombre de bactéries de l'eau du puits n° 18 diminue beaucoup en juin 1972. A cette date, l'eau de ce puits s'est chargée en alcalilignine (40 g/l) et à partir de ce moment, les bactéries n'ont pu être mises en évidence ; l'analyse microscopique révèle pourtant de nombreuses cellules bactériennes : il s'agit peut-être de bactéries tuées par un taux trop élevé en alcalilignine.

Recherche des bactéries utilisant les phénols.

On ne peut pas les mettre en évidence dans les eaux du bassin puisque le milieu ne renferme que du chlorure d'ammonium.

Par contre, ces bactéries sont bien représentées dans les eaux des autres puits et constituent de 10 à 85 p. 100 du nombre total de bactéries (tabl. 5).

TABLEAU 5

Nombre de germes/ml $\times 10^6$ *sur milieu à base de phénol de Catroux et coll.*

	Total	Phénol +	Total	Phénol +
	Dates			
Eaux	12.71	12.71	6.72	6.72
Bassin	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
7	34	6,5	< 0,1	< 0,1
18	78	40	< 0,1	< 0,1
7 B	17,5	15	7	6
7 C	15,6	1,5	0,9	0,25
7 D	21,2	6	—	—
7 E	22	8	—	—
3 B	—	—	< 0,1	< 0,1
3 C	—	—	0,5	0,2
3 D	—	—	0,07	0,03

3.3. — *Dosage des phénoloxydases*

Les résultats résumés dans le tableau 6 montrent que les deux enzymes existent dans tous les échantillons d'eau, excepté dans le n° 18. Ce dernier est, en effet, extrêmement chargé en alcalilignine et il paraît vraisemblable qu'un taux aussi élevé bloque, par une liaison trop intense avec la matière organique, l'activité des enzymes. Cette activité n'est d'ailleurs pas fonction du taux en lignine. Certains échantillons pauvres en lignine ont une grande activité. Prenons, par exemple, la série des puits n° 3 ; nous constatons que l'activité la plus élevée est décelée dans les eaux moins chargées en lignine, dans les eaux formant les fronts de migration.

Lorsqu'on mesure l'activité de ces enzymes par respirométrie, celle de la tyrosinase est la plus importante, la laccase (ou polyphénoloxydase) agissant beaucoup plus faiblement (fig. 5 et 6).

TABLEAU 6

Phénoloxydase et Polyphénoloxydase des différentes eaux (densité optique à 430 nm)

	Dates													
	12.71		3.72		6.72		10.72		1.73		6.73		10.73	
	pyro.	hydro.	pyro.	hydro.	pyro.	hydro.	pyro.	hydro.	pyro.	hydro.	pyro.	hydro.	pyro.	hydro
Bassin	1,05	1,35	—		0,25	0,63	0,14	0,3	0,27	0,65	0,15	0,41	—	
7	0,8	1,1			0,3	0,53	0,2	0,67	1,02	0,95	0,6	0,64		
18	0,3	0,35			—	—	—	—	—	—	—	—		
7 B	0,37	0,67			0,2	0,35	0,25	0,5	1,07	1,01	—	—		
7 C	0,78	1,1			0,68	1,08	1,3	2,2	3,05	2,95	2,17	2,3		
7 D	0,31	0,51			—	—	—	—	1,75	1,12	1,14	0,81		
7 E.....	0,65	0,65			—	—	—	—	—	—	—	—		
3 B	—	—			0,25	0,38	0,25	0,4	2,07	0,77	0,4	0,58		
3 C	—	—			0,36	0,64	0,22	0,42	0,62	0,88	0,4	0,52		
3 D	—	—			0,79	1,06	1,1	1,5	2,95	2,45	1,06	1,3		
5 D	—	—			—	—	—	—	0,54	0,83	0,3	0,6		
4 E.....	—	—			—	—	—	—	0,7	0,96	—	—		

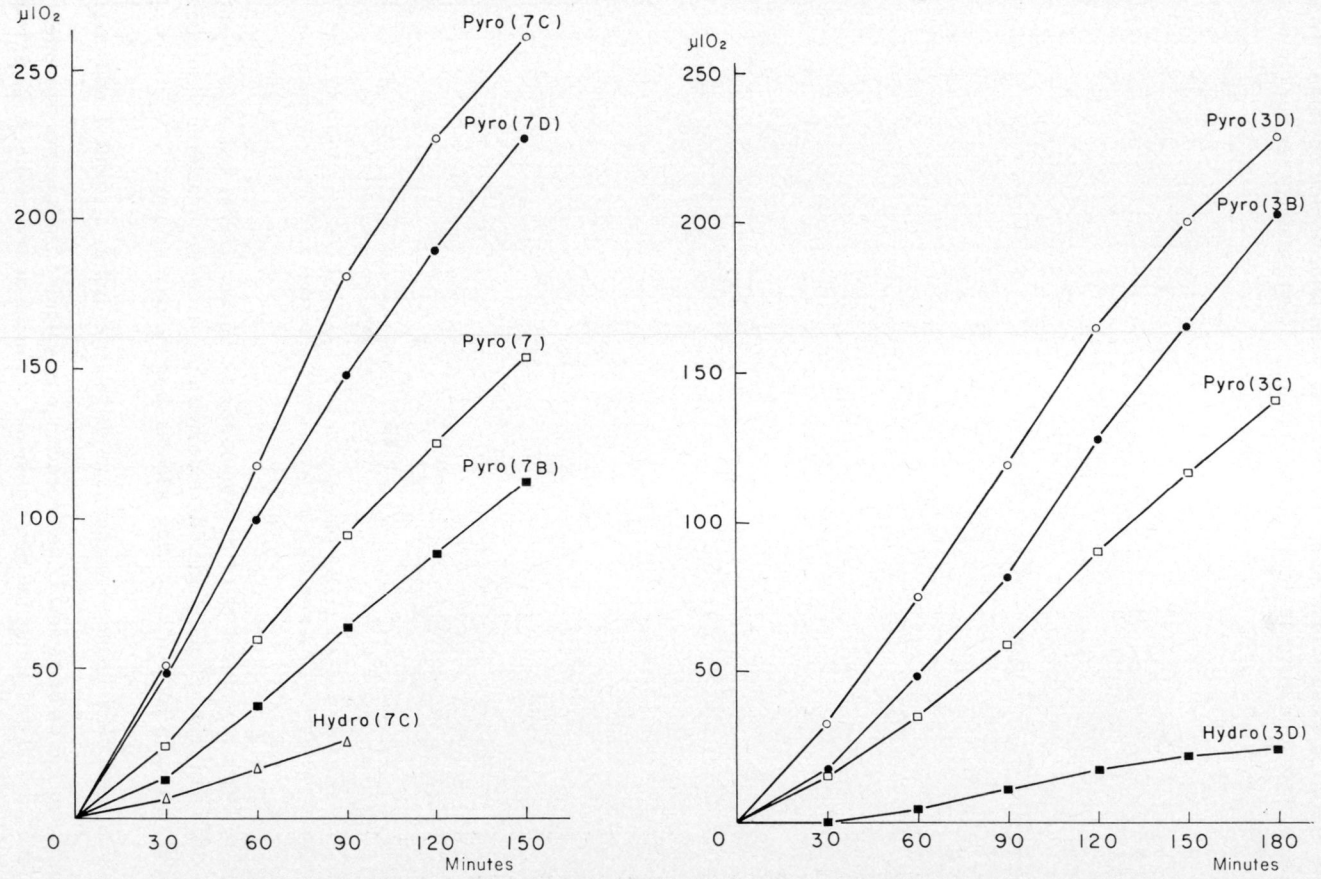


FIG. 5 et 6. — *Absorption de l'oxygène par les eaux de différents puits, additionnées de pyrogallol (pyro) ou d'hydroquinone (hydro).*

D'autre part, si on élimine les corps bactériens par centrifugation et filtration, l'activité enzymatique reste toujours aussi élevée. Par conséquent, l'activité des enzymes n'est pas liée directement à la présence de bactéries, mais plutôt à une certaine forme de matière organique dissoute dans l'eau et vraisemblablement adsorbée sur l'humo-lignine (fig. 7).

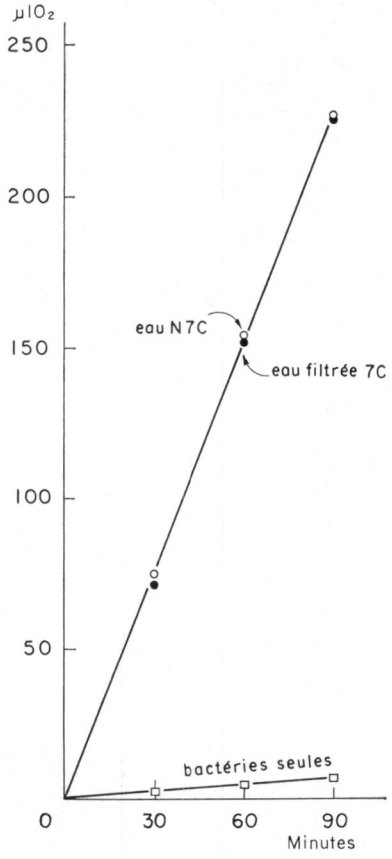


FIG. 7. — *Absorption de l'oxygène par les eaux du puits n° 7, additionnées de pyrogallol (eau n° 7C : eau brute, eau n° 7C filtrée sur millipore, bactéries de l'eau n° 7C suspendues dans du tampon phosphate).*

Ces résultats rejoignent ceux de Mayaudon et Sarkar (1974) qui montraient qu'un extrait neutre aseptique d'une litière de hêtre présente les caractères chimiques des acides humiques tout en ayant des activités diphénoloxydasiques.

3.4. *Cultures sur alcalilignine de souches pures de bactéries isolées des eaux d'infiltration*

Sur 35 souches de bactéries, 22 ne dégradent pas la lignine ; 13 souches dégradent entre 1 et 11 p. 100 de lignine, fait peu significatif. 1 souche de levure digère 22 p. 100 de lignine en présence d'asparagine et 0 p. 100 avec du chlorure d'ammonium. Aucune des souches attaquant la lignine ne provoque de halo d'éclaircissement sur le milieu de Sundman et Näse (1971).

TABLEAU 7

Teneur en alcalilignine (g/l) et pH des différentes eaux

Eaux	Dates													
	12.71		3.72		6.72		10.72		1.73		6.73		10.73	
	lign.	pH	lign.	pH	lign.	pH	lign.	pH	lign.	pH	lign.	pH	lign.	pH
Bassin	30,7	10,3	12,9	9,7	15,1	9,5	1,0	8,0	0,36	7,3	0,17	7,1	0,53	—
7	9,0	7,0	9,2	8,7	16,3	9,2	8,5	9,4	6,3	9,2	5,4	9,1	1,9	—
18	4,5	7,7	—	—	41,0	10,0	35,0	9,8	27,6	9,8	—	—	16,0	—
7 B	1,9	6,2	—	—	2,9	6,6	3,9	7,1	3,6	7,3	—	—		
7 C	1,6	5,6	2,4	8,5	3,2	6,8	3,8	6,6	2,8	6,9	1,0	6,8		
7 D	1,4	6,2	13,9	8,3	—	—	—	—	4,2	7,4	2,7	7,5		
7 E	13,1	6,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3 B	—	—	—	—	2,9	7,5	2,9	7,2	2,2	7,4	1,6	7,6		
3 C	2,1	5,9	—	—	1,1	6,6	0,7	6,8	0,66	6,7	0,68	6,9		
3 D	1,0	5,9	—	—	0,7	6,4	0,6	6,4	0,34	6,8	0,45	7,0		
5 D	2,3	6,0	—	—	—	—	—	—	0,32	6,9	0,29	7,5		
4 E	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	6,3	—	—		
	pesée		pesée		pesée		pesée		permanganate					

Rappelons que Marchand (1971) trouve, pour 6 espèces de bactéries et en l'absence de glucose, une diminution du taux de lignine de 2 à 10 p. 100 en 45 jours, sauf dans le cas d'une association de deux bactéries où la dégradation atteint 33 p. 100 après 35 jours d'incubation. En présence de glucose, le taux de dégradation est plus élevé.

Dosage du taux d'azote de la lignine récupérée après culture des bactéries.

Parmi 27 souches bactériennes cultivées sur alcalilignine avec l'asparagine comme source d'azote, 9 souches ne modifient pas l'alcalilignine quant à sa teneur en azote, et 18 souches augmentent de 1,1 à 9 fois le taux d'azote de la lignine extraite après la culture. La lignine, en présence de bactéries et d'un acide aminé, s'enrichit en azote. il est possible que des protéines ou des peptides microbiens se fixent sur l'alcalilignine au cours de la culture comme les protéines se fixent sur les nucléus des acides humiques (Simonart, Batistic et Mayaudon, 1967). L'alcalilignine, riche en azote, devrait pouvoir servir d'amendement en agronomie. Il s'agit là d'une hypothèse.

3.5. — *Analyses physico-chimiques*

Les résultats sont résumés dans les tableaux 7 à 10 et les figures 8.

Alcalilignine.

La quantité d'alcalilignine diminue avec l'augmentation de la distance du point d'épandage. Cette substance est progressivement éliminée. Toutefois, considérons la teneur du bassin en décembre 1971 et celle du n° 18 en juin 1972 : les fortes teneurs en lignine ont brusquement migré à 40 m du point d'épandage et à 10 m de profondeur. Comme le bassin n'a pas reçu de nouvelles quantités d'eau chargées, la lignine disparaît, progressivement diluée par les eaux de pluie, mais de fortes doses de cette substance subsistent pendant un temps assez long au niveau du puits n° 18. Il y a donc des risques de contamination de la nappe phréatique.

TABLEAU 8

Teneur en phénol des différentes eaux (mg/l)

	Dates		
	10.72	6.73	10.73
Bassin	0,48	0,32	0,32
7	4,7	2,3	1,1
18	74,0	—	26,4
7 B.....	3,6	—	
7 C	1,6	0,05	
7 D	—	0,75	
7 E	—	—	
3 B.....	3,8	1,25	
3 C	0,04	0,035	
3 D	0,02	0,000	
5 D	—	0,035	

TABLEAU 9

Analyse des sables à différentes profondeurs

A : reçoivent des lignines à partir de 4 m
B : n'ont jamais reçu de lignine

Niveau (m)	Alcalilignines ou Acides humiques p. 100		Polyphénol oxydase pyrogallol		Polyphénol oxydase hydroquinone	
	A	B	A	B	A	B
0,5	0,276	0,348		6,15		0,59
1	0,216	0,081	6,35		0,58	
1,5	0,140	0,071				
2	0,055	0,078		2,6		0,50
2,5	0,044	0,060				
3	0,044	0,061	1,77		0,54	
3,5	0,041	0,108				
4	0,083	0,067				
4,5	0,061	0,062				
5	0,131	0,084	1,85	2,0	0,76	0,55
5,5	0,078	0,097				
6	0,086	0,092				
6,5	0,041	0,047				
7	0,028	0,035	1,75			
7,5	0,060	0,041		2,34	0,50	0,61
8	0,045	0,027				
8,5		0,038				
9,0		0,028				

pH.

Le pH est directement proportionnel à la teneur en lignine (excepté celui de l'eau du puits 7 E prélevé en décembre 1971). On retrouve des pH franchement alcalins à proximité du point d'épandage du bassin jusqu'au puits n° 18. Plus loin, le pH est neutre ou légèrement acide.

Phénols.

Leur teneur est directement fonction de celle de l'alcalilignine. Aussi, ce sont les échantillons les plus proches du bassin qui contiennent le plus de phénols ; ceux-ci diminuent au fur et à mesure de l'infiltration de l'eau à travers le sol, ce qui est en accord avec les résultats de Jacquemain et coll. (1975).

TABLEAU 10

Taux de groupes methoxyls en p. 100 OCH_3 *des alcalilignines aux différents points de prélèvements* *

	p. 100 OCH_3
Alcalilignine dialysée et neutralisée de la chaudière.	11
Alcalilignine dialysée et lyophillisée de la chaudière.	8,3
Alcalilignine du bassin en décembre 1971.....	9,9
Alcalilignine du bassin en juin 1972.....	2,6
Alcalilignine du puits n° 7.....	2,7
Alcalilig ine du puits n° 18	6,0
Alcalilignine du puits n° 7 B	1,8
Alcalilignine du puits n° 7 C.....	1,5
Alcalilignine du puits n° 3 B	1,9
Alcalilignine du puits n° 3 C.....	0,6
Alcalilignine du puits n° 3 D	0,5

* Les échantillons prélevés en juin 1972 n'ont été analysés qu'en mars 1974. Entre ces deux dates, ils ont été conservés à l'état liquide + 3° et à l'état lyophilisé.

Analyse des sables en profondeur.

Des carottes de sables ont été prélevées à 0,5 m d'intervalle jusqu'à 9 m de profondeur.

Les échantillons A reçoivent des alcalilignines à partir de 4 m de profondeur, les échantillons B n'en reçoivent pas. L'accumulation d'alcalilignine ne se produit à aucun niveau. Tout au plus, les teneurs sont-elles un peu plus élevées entre 4 et 5 m, dans les échantillons A.

Constitution des alcalilignines aux différents points de prélèvement.

Au fur et à mesure de leur épuration, les alcalilignines perdent leurs groupements OCH_3. La simple stagnation de l'eau pendant 7 mois dans le bassin d'infiltration fait perdre 7,3 p. 100 d'OCH_3 à l'alcalilignine. On retrouve au point n° 18 à 40 m du point d'épandage un taux plus élevé (6 p. 100) de groupements méthoxyls, preuve que l'alcalilignine a migré jusqu'à ce point sans épuration. A 260 m du point d'épandage, il ne reste plus que 0,6 p. 100 de groupements méthoxyls.

Spectres infrarouges.

(Mêmes échantillons que pour le dosage OCH_3).

Ils sont donnés dans les figures 8 représentant divers types de lignine.

Lignine de la chaudière (fig. 8*a*).

Les pics caractéristiques de la lignine sont les suivants :

880 CH aromatique, déformation hors du plan ;

1030 typique de la lignine CH aromatique, déformation dans le plan type guaiacyl, CO déformation, alcool primaire ;

1140 CH aromatique, déformation dans le plan type guaiacyl ;

1270 noyau guaiacyl avec valence CO ;

1450 déformation CH assymétrique ;

1510 } vibration des restes phényls, noyau aromatique C = C ;
1600 }

1710 absence de C = O.

Il s'agit d'une lignine type guaiacyl de pin, fortement dégénérée quant aux groupes C = O.

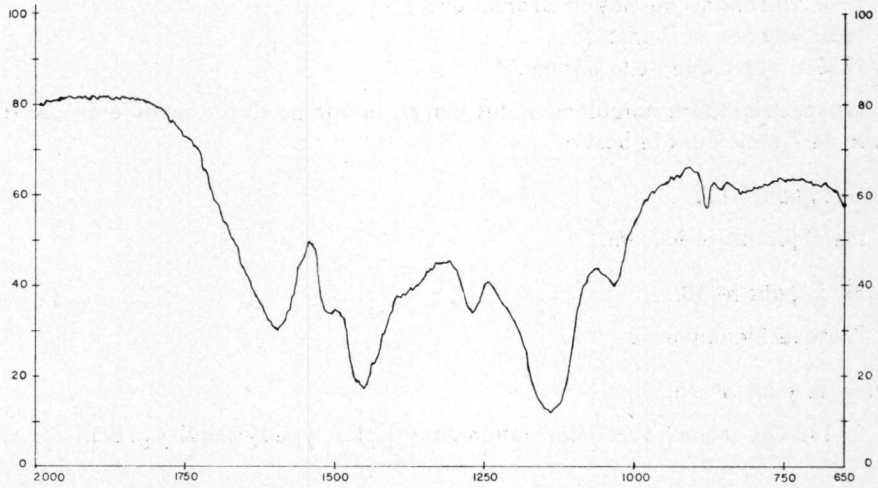


FIG. 8*a*. — *Spectre infrarouge de la lignine de chaudière lyophilisée.*

Lignine du bassin (prélèvement de décembre 1971).

Nous trouvons les mêmes pics que précédemment, d'où les mêmes conclusions.

Lignine du bassin (prélèvement de juin 1972, fig. 8*b*).

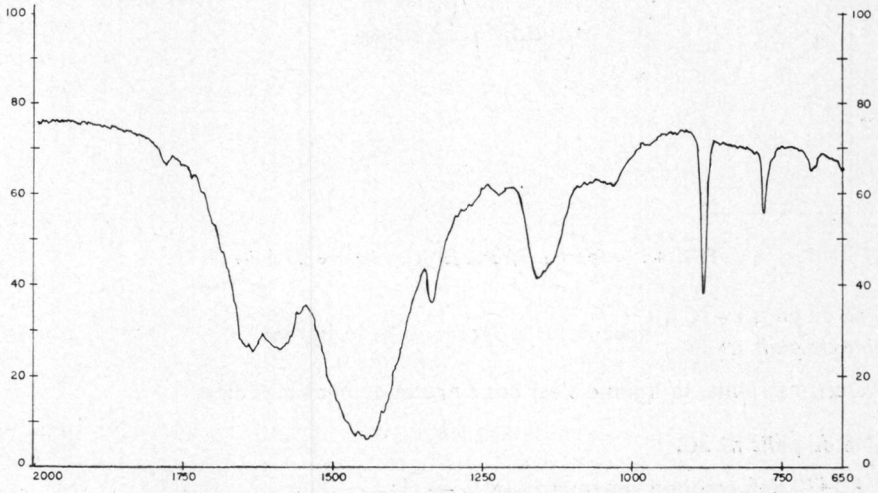


FIG. 8*b*. — *Spectre infrarouge de la lignine du bassin en juin* 1972.

700, 780, 880 } pics non typiques de la lignine ;
1030 *idem* à la lignine de la chaudière, mais pic nettement diminué ;
1220, 1330 } syringyl lié avec valence CO ;
1460 déformations CH ;
1590 vibrations du noyau aromatique ;
1630 valence carbonyl ;
1780 non typique de la lignine.

Ce spectre diffère notablement des autres, la lignine s'est donc altérée après un séjour de 7 mois dans le bassin.

Lignine du puits n° 7.

Identique au précédent.

Lignine du puits n° 18.

Presque identique au n° 7.

Lignine du puits n° 7B.

à 1130 CH aromatique, déformation dans le plan type syringyl (fig. 8c).

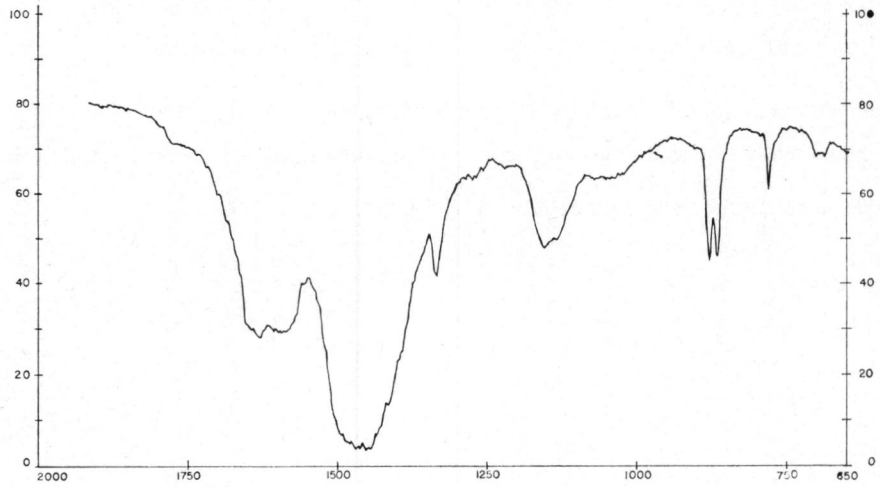


FIG. 8c. — *Spectre infrarouge de la lignine du puits n° 7B.*

Lignine du puits n° 7C, *Lignine du puits n° 3B* } spectres non typiques de la lignine.

Dans ces puits, la lignine s'est donc profondément modifiée.

Lignine du puits n° 3C.

A 1470 déformation assymétrique C — H ;
1675-1660 valence carbonyl aryl-cétone para-substituée

Lignine du puits n° 3D (fig. 8*d*).

De 650 à 1250 pics non typiques de la lignine ;
1430 vibration du squelette aromatique ;
1470 déformation CH ;
1660 valence carbonyl aryl-cétone para substituée.

Quelques pics caractéristiques de la lignine subsistent encore mais celle-ci s'est beaucoup modifiée.

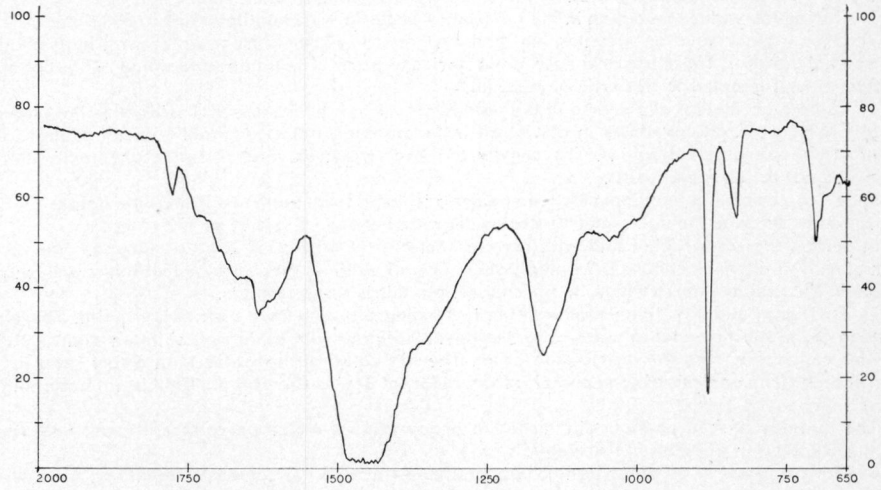


FIG. 8*d*. — *Spectre infrarouge de la lignine du puits n° 3D.*

IV. — Conclusions

Au cours de son infiltration dans le sol, l'alcalilignine subit une dégradation de sa structure. Cette dégradation provient, au moins en partie, de l'activité microbienne et des enzymes non liées aux cellules microbiennes. Les eaux résiduaires de papeteries chargées en alcalilignine peuvent donc être épurées par épandage dans des bassins, puis infiltration dans le sol, à condition que leur taux en alcalilignine ne soit pas trop élevé. Lorsque ce taux est trop élevé, les eaux non épurées migrent loin du point d'épandage en profondeur mettant ainsi en danger la nappe phréatique.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

Nous remercions M. le Dr Th. Weichelt de Göttingen (Interfakultatives Lehrgebiet Chemie der Universität) pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée dans l'interprétation de nos spectres infrarouges d'alcalilignine. Nous remercions, d'autre part, M. Michel Marchand, Maître-Assistant au Laboratoire de Botanique appliquée et de Microbiologie de l'Université de Bordeaux I, qui nous a fourni les échantillons d'eaux, de sables et des documents.

La partie expérimentale de ce travail a été effectuée dans les laboratoires du service de microbiologie et de biochimie des milieux naturels à l'Institut Pasteur de Jouy-en-Josas.

Summary

About the purification of alkalilignin containing waste water by the soil

Studying the purification of alkalilignin containing waste water by earth leacage we observed the ecology and the nutrition of the bacteria living in the water and determined the physical and chemical characteristics of the lignins. The results obtained bring out the following facts :

1) The addition of different fractions of « black solution » to the ironpan of the Landes provokes various CO_2 separations. The adjunction of a fraction with purified alkalilignin provokes a CO_2 separation 3 to 4 times less important than by the crude « black solution ».

2) During the water incubation in the laboratory bacteria were multiplying 4 to 800 times.

3) On a « black solution » containing medium only the bacteria from water with high alkalilignin content develop. These bacteria need amino-acids to grow. The lignin containing water abound in bacteria well adapted to this type of medium.

4) Quite a great deal of bacteria in the tested water from different wells metabolize the phenols.

5) There are phenoloxydases in almost all water samples, but their quantity is not proportional to that of phenols or alkalilignins. The activity of those enzyms is relative to the organic matter of water and not to microbian cells.

6) In pure culture in the laboratory the bacteria isolated from water degrade little lignin. 22 of 36 strains do not degrade the lignin and 13 strains degrade between 1 and 11 p. 100 of lignin.

In presence of asparagine and with certain bacteria (18 strains of 27), the nitrogen rate of the lignin extracted after the culture is 9 times higher. The alkalilignin thus enriched with nitrogen should be able to be used as improvement in agriculture, but this is an hypothesis.

7) The lignin quantity diminishes with the increasing distance from distribution point. Therefore purifying of the substance takes place progressively. A solution with a high alkalilignin concentration migrates rather far from the distribution point. The pH value of the water is in direct ratio to the lignin content. The analysis of sand samples from different depths shows that lignin is not accumulated at any level.

The quantity of free phenols diminishes in proportion as water percolates the soil and varies with the alkalilignin quantity of the water.

8) The composition of water lignins was analysed through the content of methoxyl groups and IR-spectra. During their purification the lignins lose progressively their methoxyl group. The IR-spectra reveal a structural degradation of alkalilignin during the earth leacage, but also an enrichment with new functions.

Zusammenfassung

Uber die Klärung alkaliligninhaltiger Abwasser im Boden

Im Verlaufe einer Forschungsarbeit über die Klärung alkalilignin-haltigen Wassers durch das Einsickern in den Boden haben wir die Ökologie und die Ernährung der im Wasser lebenden Bakterien untersucht und die physisch-chemischen Eigenschaften der Lignine ermittelt. Die Ergebnisse heben folgende Tatsachen besonders hervor :

1) Die Beifügung von diversen Anteilen einer schwarzen Lösung aus der Eisenverdichtungsschicht der Landes lässt unterschiedliche CO_2 freiwerden. Das Zusetzen einer Lösung mit gereinigtem Alkalilignin setzt CO_2 in 3 bis 4-facher weniger Menge frei als bei Verwendung der reinen schwarzen Lösung.

2) Während der Inkubation des wassers im Labor vermehren sich die Bakterien 4 *bis* 800 mal,

3) Auf einem Nährboden aus der schwarzen Lösung entwickeln sich nur diejenigen Bakterien. die aus sehr alkaliligninreichem Wasser stammen. Diese Bakterien benötigen zum Wachstum Aminosäuren. Die ligninhaltigen wasser weisen reichlich Bakterien auf, die diesem Nährbodentyp gut angepasst sind.

4) Im wasser, das den verschiedenen Brunnen entnommen wurde, metabolisiert ein grosser Anteil der Bakterien die Phenole.

5) Die Phenoloxydasen sind fast in allen wasserproben vorhanden. Mengenmässig entsprechen sie jedoch nicht den Phenol-oder Alkaliligninanteilen. Die Aktivität dieser Enzyme hängt mit dem organischen stoff des wassers zusammen und nicht mit den Mikrobenzellen.

6) In der Reinkultur im Labor bauen die Bakterien, die aus den Wasserproben isoliert wurden, wenig Lignin ab. Von 36 Stämmen bauen 22 überhauptkeines ab, und 13 Stämme bauen zwischen

1 und 11 p. 100 Lignin ab. Bei Vorhandensein von Asparagin und zusammen mit gewissen Bakterien steigt der Stickstoffgehalt des Lignins, das nach der Kultur entnommen wurde, bei 18 von 27 Stämmen ums neunfache an. Das somit an Stickstoff angereicherte Alkalilignin müsste nach unserer Hypothese in der Landwirtschaft als Düngemittel verwendbar sein.

7) Je grösser der Abstand vom Ausgangspunkt ist, um so mehr nimmt die Ligninmenge ab. Es erfolgt also eine progressive Klärung dieser Substanz. Beim Vergiessen einer sehr konzentrierten Alkaliligninlösung entfernt sich diese ziemlich weit vom Ausgangsopunkt. Die pH-Zahl des Wassers steht in direktem Verhältnis mit dem Ligningehalt. Eine Analyse von Sandproben aus verschiedenen Tiefen beweist, dass in keiner Lage eine Anhäufung von Lignin vorkommt.

Die Menge freier Phenole nimmt beim Eindringen des Wassers in den Boden allmählich ab. Sie ist verschieden hoch je nach der Alkaliligninmenge im Wasser.

8) Die Beschaffenheit der Lignine im Wasser wurde an Hand des Methoxylgruppengehalts und auf Grund der Spektren im Infrarotlicht analysiert. Bei der allmählichen Klärung verlieren die Lignine ihre Methoxylgruppe. Die Infrarotspektren zeigen deutlich, dass das Alkalilignin im Verlaufe des Einsickerns in den Boden einem Strukturabbau unterworfen ist, es aber eine Anreicherung neuer Funktionen erfährt.

РЕЗЮМЕ

О почвенном очищении сточных вод насыщенных щелочным лигнином.

П. КЕЙЗЕР.

При изучении очищения вод насыщенных щелочным лигнином, при помощи их просачивания через почву, исследовались экология и питание бактерий населяющих эти воды, и определялись физико-химические характерности лигнинов. Из полученных результатов можно вывести следующие заключения:

1) Прибавление различных фракций черной жидкости к ортштейну из департамента Ланд вызывает выделение разных количеств CO_2. Прибавление фракции содержащей очищенный щелочной лигнин вызывает такое-же выделение, но в 3-4 раза большее чем выделение из неочищенной черной жидкости.

2) В течении инкубации вод в лаборатории бактерии размножаются от 4 до 800 раз.

3) В среде приготовленной на базе черной жидкости развиваются только бактерии вод сильно насыщенных лигнином. Бактерии эти нуждаются в амино-кислотах для своего роста. Воды насыщенные лигнином содержат крупные количества бактерий приспособленных к среде этого типа.

4) Часть бактерий вод из разных колодцев метаболизирует фенолы.

5) В почти всех образцах воды найдены фенолоксидазы, но их количество не пропорционально количеству фенолов, или щелочных лигнинов. Активность этих энзимов зависит от органического вещества воды и не связано с микробиальными клетками.

6) В чистой культуре, в лаборатории, бактерии изолированные из вод плохо деградируют лигнин. 22 клона из 36 не деградируют его, а 13 деградируют только от 1 до 11 р. 100 этого вещества. В присутствии аспарагина и некоторых бактерий (18 клонов из 27) процент лигнина экстрагированного после культуры увеличивается в 9 раз. Щелочной лигнин, обогащенный азотом, мог-бы применяться в сельском хозяйстве для мелиорации. Но это только гипотеза.

7) Количество лигнина уменьшается в водах по мере увеличения расстояния от точки полива. Это означает что происходит прогрессивное очищение этого вещества. Когда полив производится раствором с сильной концентрацией щелочного лигнина, раствор этот мигрирует довольно далеко от точки приложения. pH вод прямо пропорционален содержанию лигнина. Анализ песков на разных глубинах показывает что ни на каком уровне не происходит накопления лигнина.

Количество свободных фенолов уменьшается по мере проникновения вод в почву. Оно изменяется в зависимости от прцентного содержания в них щелочного лигнина.

8) Состав лигнинов вод был проанализирован при помощи метода количества метоксильных груп и метода спектров в инфра-красных лучах. По мере их очищения лигнины теряют метоксильные группы. Инфра-красные спектры показывают, что по мере его проникновения в почву, структура щелочного лигнина деградируется и обогащается новыми функциями.

Références bibliographiques

BRAUNS E., 1952. *The Chemistry of lignin*. Academic Press.

CATROUX G., FOURNIER J. C. et RIVIÈRE J., 1969. Mise en évidence rapide de l'utilisation des acides phénols par des souches bactériennes isolées du sol. *Ann. Inst. Pasteur*, **116**, 99-102.

JACQUEMAIN R. et coll., 1975. Etudes et comparaisons des déterminations des phénols dans les eaux, applications à l'examen d'un rejet de papeterie. *Journ. Français d'Hydrologie* 16, 25-33.

MARCHAND M., 1971. *L'épuration biologique des eaux résiduaires de papeterie par infiltration dans le sol : modalités, biodégration des alcalilignines*. Thèse Université de Bordeaux I, n° 330.

MARCHAND M., 1972. Les eaux résiduaires de papeteries. Un exemple d'épuration biologique par le sol. *Bul. de l'ass. pharm. française pour l'hydrologie* 8, 19.

MAYAUDON J. et SARKAR J. M., 1974. Etude des diphénoloxydases extraites d'une litière de forêt. *Soil Biol. Biochem.* **6**, 269-274.

POCHON J. et TARDIEUX P., 1962. *Méthodes d'analyses en microbiologie du sol*. Ed. La Tourelle St Mandé.

SIMONART P., BATISTIC L., MAYAUDON J., 1967. Isolation of protein from humic acid extracted from soil. *Plant and Soil* **27**, 153-161.

SUNDMAN V. et NÄSE L., 1971. A simple plate test for direct utilisation of biological lignin degradation. *Paper a. Timber* **53**, 67-71.

TARAS M. J. et coll., 1971. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 13e édition Amer. Public Health Association Washington DC.

TROJANOWSKI J. et LEONOWICZ A. 1971. The fungal metabolism of lignin and products of lignin degradation. *Humus u. Planta*, 215.

Ann. agron., 1977, **28** (3), 313-328.

Effets de fertilisations azotées de différents niveaux en rotation céréalière dans le Sud-Ouest de la France

I. — Production de grains et de protéines

J. DECAU *, M. COMBRET ** et B. PUJOL *

avec la collaboration de A. PACE * et M. MONDIES *

* *Station d'Agronomie. Centre de Recherches de Toulouse, I.N.R.A., B.P. nº 12, 31320 Castanet-Tolosan*

** *Ecole Nationale de Formation Agronomique B.P. nº 4, 31320 Castanet-Tolosan*

Résumé

Quatre niveaux de fertilisation azotée, 0, 50, 100, 150 kg d'azote/ha (1966-1970) puis 0, 70, 140, 210 kg/ha (1971-1975) ont été appliqués à une rotation céréalière bisannuelle classique, dans le Lauragais, en terre argilo-calcaire du Sud-Ouest de la France. Rendements en grains, teneurs en protéines et, dans quelques cas, qualité des protéines (teneur en lysine) ont été mesurés.

Les rendements en grain ont varié de 6 à 44 q/ha chez les blés, de 23 à 59 q/ha chez les sorghos, de 42 à 72 q/ha chez le maïs, augmentant le plus souvent de manière continue dans tout l'intervalle des fumures expérimentées. Par ailleurs, la quantité de protéines produites augmente linéairement avec la fertilisation appliquée.

La teneur des grains en protéines diffère selon l'espèce cultivée et la fumure : on note une corrélation négative entre teneur en protéines et rendement, pour l'ensemble des espèces, et un effet le plus souvent positif de la fertilisation. La qualité protéique, mesurée par la teneur en lysine du grain, est plus grande et plus variable selon la fumure chez une espèce à rendement en grain limité (blé dur) que chez un maïs à haute production.

Quelle que soit la culture, le seuil de rentabilité des engrais se situe à un niveau très supérieur aux quantités nécessaires pour compenser les exportations. En conséquence, le coefficient d'utilisation est très faible (25 p. 100) et pose, à long terme, le problème du devenir de ces excédents cumulés.

A. — Introduction

Les effets exercés par les apports d'engrais azotés sur le cycle de l'azote et sur le comportement des cultures ont fait l'objet de nombreux travaux. Cependant, par suite de l'évolution rapide des systèmes culturaux (spécialisation des cultures, disparition du bétail, irrigation, fertilisation...), il nous a paru intéressant d'étudier l'évolution d'un système simple en ne faisant varier que les niveaux de fertilisation azotée.

En une première approche, dans le cas d'une rotation céréalière-type actuellement pratiquée dans le Sud-Ouest de la France, nous avons d'une part, étudié les effets immédiats et à long terme du niveau de fertilisation azotée sur la production

quantitative et qualitative des cultures et, d'autre part, situé ces effets dans le bilan général de l'azote dans le complexe étudié : climat-sol-plantes.

Dans ce mémoire, nous envisagerons seulement l'action des fumures sur la production végétale quantitative et qualitative.

B. — Conditions expérimentales

Un essai de longue durée a été mis en place en 1966 sur sol argilo-calcaire, en Lauragais, terroir situé à l'Est de Toulouse.

La composition granulométrique de la terre (tabl. 1) s'inscrit dans la moyenne des sols de même type du Sud-Ouest de la France, désignés sous le terme de «terreforts». Le sol est surtout caractérisé par sa teneur élevée en argiles, montmorillonites et illites (Blanchet *et al.*, 1968), sa faible teneur en matières organiques (Decau *et al.*, 1962), sa profondeur, le plus souvent de l'ordre de 0,7 m à 1 m, prolongée par un complexe d'altération molassique relativement perméable, et ses réserves hydriques élevées, de l'ordre de 220 à 240 mm (Maertens *et al.*, 1974).

TABLEAU 1

Caractéristiques analytiques du sol d'expérience

	Couche arable (0-20 cm)	Sous-sol (20-40 cm)
Argile p. 100	32,8	37,1
Limon p. 100	16,7	16,2
Sable très fin p. 100	25,2	22,5
Sable fin p. 100	15,7	15,6
Sable grossier p. 100	4,8	4,4
Calcaire p. 100	1,5	1,8
Matière organique p. 100	1,6	0,8
Carbone p. 1 000	9,1	5,0
Azote p. 1 000	0,97	0,59
Rapport C/N	9,3	8,5
pH (eau)	7,7	7,8

L'assolement choisi est un assolement céréalier bisannuel de type sorgho-blé adapté aux contingences agricoles et aux possibilités climatiques. Ainsi se sont succédées les cultures indiquées dans le tableau 2.

Une forte fumure phosphopotassique (250 kg P_2O_5 et 140 kg K_2O) a été appliquée au début de l'essai ; elle a été complétée ensuite par des apports couvrant largement les exportations.

La fertilisation azotée a été apportée, durant les 5 premières années (1966-1970) aux doses annuelles de 50, 100 ou 150 kg/ha d'élément pur, sous forme d'ammonitrate à 33,5 p. 100 (fumures F_1, F_2, F_3), un lot de parcelles ne recevant pas d'engrais azoté (F_0) ; les apports ont été fractionnés : un tiers, soit 17, 33 ou 50 kg/ha avant enfouissement des pailles, les deux tiers avant semis (sorgho, maïs) ou au tallage (blé). Ces 5 dernières années (1971-1975), la fumure a été portée à 70, 140 ou 210 kg/N/ha. Le

TABLEAU 2

Cultures successives des espèces et variétés

Année de culture	Espèce	Variété
1966	Sorgho	NK 120
1967	Blé dur	BIDI 17
1968	Maïs	PIONNEER 368 A
1969	Blé tendre	MAGALI
1970	Sorgho	INRA 450
1971	Blé tendre	MAGALI
1972	Sorgho	NK 123
1973	Blé tendre	MAGALI
1974	Sorgho	NK 123
1975	Blé dur	BIDI 17

supplément d'azote, par rapport au traitement précédent, a été fourni soit au semis (sorgho), soit en début de montaison (blé).

Les cultures ont été conduites sans irrigation, dans les conditions courantes de la pratique agricole. En particulier, les récoltes ont été réalisées à la moissonneuse-batteuse, les pailles retournant au sol, leur enfouissement étant fait au labour. Toutefois des observations au champ et des prélèvements manuels ont été pratiqués ; ils ont permis de déterminer les composantes des rendements et d'étudier la composition des produits : grains et pailles. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à cet égard aux teneurs en azote et à la composition protéique.

C. — Résultats

I. — *Rendements en grain*

Les productions obtenues diffèrent selon l'espèce cultivée, l'année climatique et la fumure appliquée. Les courbes (fig. 1) se différencient ainsi nettement par leur ordonnée à l'origine, leur pente et leur courbure.

En l'absence de fumure, le sorgho (S) et le maïs (M) ont produit davantage que le blé tendre (Bt) et que le blé dur (Bd). Il existe toutefois, pour une même espèce, des différences importantes (fig. 1 A, courbes S 72 et S 74) propres à l'année climatique, mais on ne note pas de variations régulières liées à l'année de culture ; on peut de ce fait conclure en particulier que les écarts de rendement ne tirent pas leur origine dans un épuisement progressif des réserves azotées du milieu.

A partir de ces productions minimales, la fumure azotée amène des accroissements moyens de rendement variables selon l'espèce, l'année de culture et la gamme des apports.

Ainsi, la productivité moyenne de l'azote déterminé par l'accroissement des rendements entre F_0 et F_3, donne les valeurs suivantes en kg de grain par kg d'azote apporté :

— Maïs : 19,7 ;
— Sorgho : 8,7 à 13,3 ;
— Blé : 11,7 à 17,9.

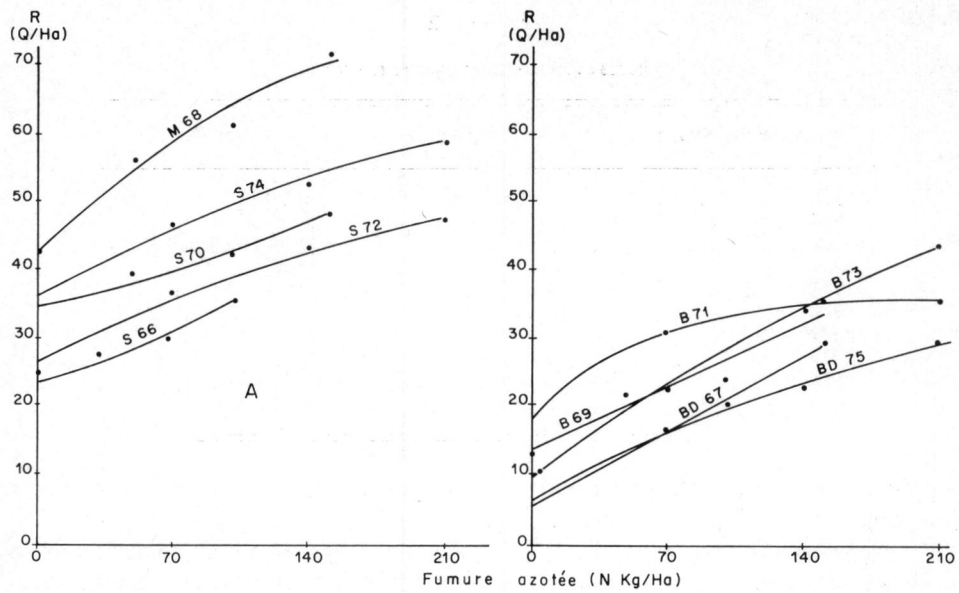


FIG. 1. — *Rendements en grain R (q/ha) des céréales successives ((M 68) — les sigles indiquent : l'espèce cultivée (M = Maïs ; S = Sorgho ; B = Blé tendre ; BD = Blé dur), l'année de culture.*

Mais des écarts existent aussi le plus souvent pour une même culture, selon le niveau de fertilisation appliqué. Quand la fumure augmente, les accroissements de rendement sont moins que proportionnels (M 68, B 71, B 73 par exemple) ou sont en relation linéaire avec les apports (Bd 67, B 69) ou au contraire plus que proportionnels (S 66, S 70) (Decau *et al.*, 1971), mais, quelle que soit la culture, les rendements demeurent croissants dans toute la gamme des fumures appliquées.

II. — *Production de protéines*

La production de protéines (fig. 2) apparaît, quelle que soit l'espèce végétale, comme une fonction toujours croissante de la dose d'azote apportée.

Souvent, la relation entre rendement protéique et fumure azotée est linéaire (courbes M 68, S 70, Bt 73 et Bd 75) mais les courbes diffèrent encore par leur ordonnée à l'origine, plus élevée chez les sorghos et plus encore chez le maïs ainsi que par leur pente. La réponse à la fumure est plus élevée chez le maïs et chez quelques blés (Bd 67, Bt 69, Bt 73) que chez le sorgho (fig. 2). Elle ne présente pas de gradient régulier avec l'année de culture.

Ainsi, la production protéique apparaît la plus grande, dans l'ensemble, chez le Maïs (300 à 600 kg par ha) et chez le Sorgho (200 à 500 kg/ha), bien que les blés (Bt 69, Bt 73) puissent atteindre aussi, grâce à de fortes fumures, des productions très élevées (400 à 600 kg/ha). Pour une même fertilisation, 100 kg/ha par exemple, la production protéique varie aussi d'une spéculation à l'autre, de 200 à 500 kg, du blé dur au maïs, mais les écarts de production protéique apparaissent toutefois plus faibles que ceux des rendements en grains.

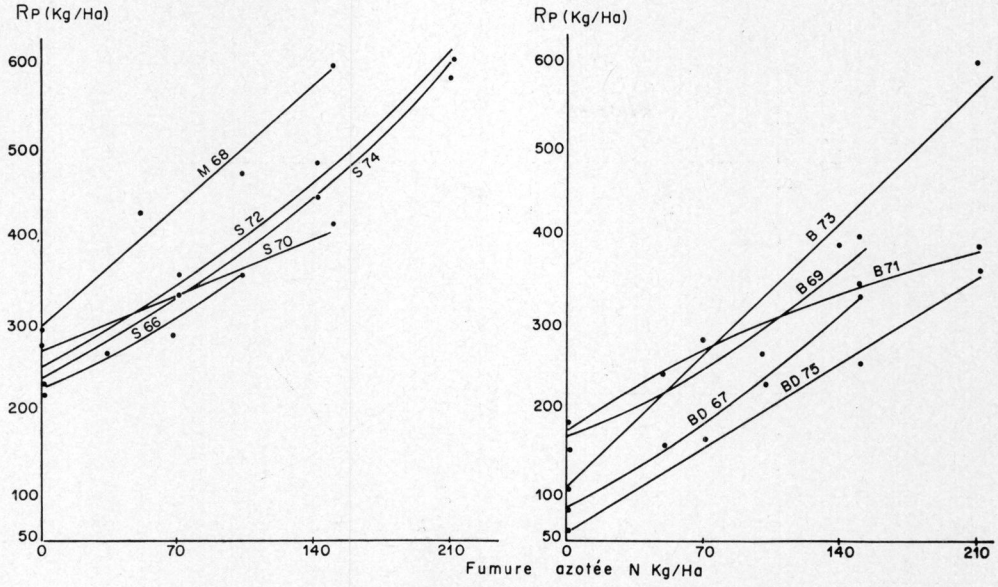


FIG. 2. — *Production protéique (RP kg/ha) des différentes cultures* (voir légende fig. 1.).

III. — *Rendements et teneur des grains en protéines*

Il apparaît tout d'abord (fig. 3), pour l'ensemble des espèces cultivées, une relation inverse entre rendement en grain et teneur en protéines (courbes I et II), les sorghos et plus encore le maïs, dont les productions sont importantes, étant les plus faiblement pourvus en protéines tandis que les blés, et particulièrement les blés durs, aux rendements limités, sont mieux pourvus en matières azotées. Cette relation n'apparaît pas liée à une disponibilité limitée en azote minéral, puisqu'elle existe aussi bien lorsque la fourniture d'azote est très abondante (courbe I) que lorsqu'elle est nulle (courbe II).

L'effet des fumures azotées diffère selon l'espèce cultivée. Tandis que chez les céréales d'été, la teneur en protéines croît quasi systématiquement avec les fumures en même temps que le rendement, nous observons, le plus souvent, chez les blés (courbes Bd 67, Bt 69, Bt 71) une diminution des teneurs en protéines sous l'effet de fumures faibles ou moyennes : celles-ci contribuent, par le biais du tallage, à un accroissement préférentiel du rendement, tandis que les fumures les plus fortes provoquent dans tous les cas un accroissement simultané du rendement et de la teneur en protéines.

Toutefois, les phénomènes ainsi observés, et qui intéressent les premières années d'expérimentation, tendent ensuite à disparaître (Bt 73, Bd 75) : ceci paraît résulter de l'appauvrissement en azote des parcelles témoins.

IV. — *Qualité des protéines*

Les différentes espèces cultivées sont toutes des céréales. Celles-ci, quelle que soit l'espèce, présentent au niveau du grain un « spectre protéique » très analogue :

— abondance de prolamines (gliadines, zéine, kafirine) et de glutélines, riches en acide glutamique et en proline ;

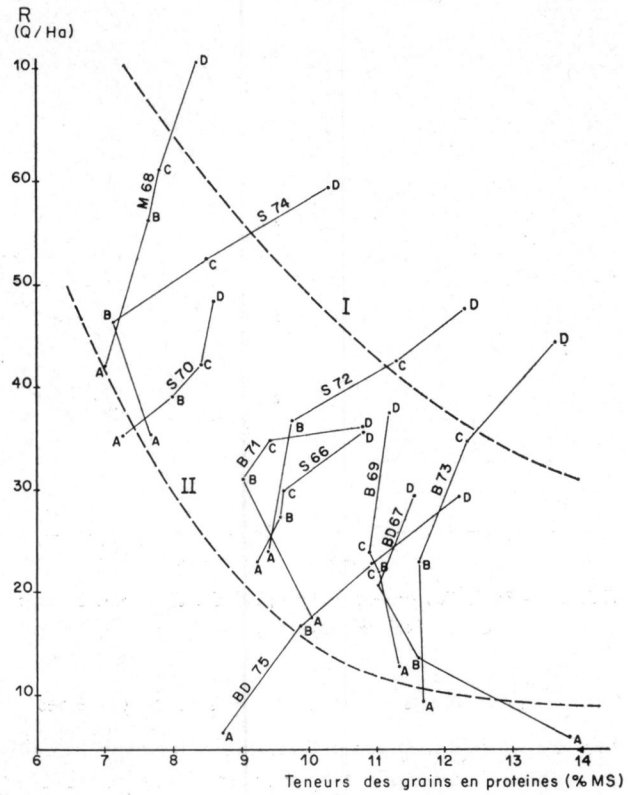


FIG. 3. — *Relation entre rendements en grain et teneurs en protéines chez les différentes céréales (B, C, D : niveaux des fumures F1, F2, F3 ; A : absence de fumure azotée,* F_0).

— pauvreté en protéines de faible poids moléculaire comme les albumines et les globulines, plus riches en acides aminés indispensables comme la lysine.

Sans s'attendre à des modifications très importantes, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la composition protéique, d'une espèce à l'autre, sous l'action de la fumure azotée, et principalement à la teneur en lysine.

Il apparaît toutefois des écarts marqués, notamment dans les réponses à la fumure entre les blés d'une part, le maïs et les sorghos d'autre part surtout si nous considérons la teneur en lysine de l'ensemble protéique de la graine.

Chez le blé où nos analyses concernent le blé dur cultivé en 1975, on observe une relative stabilité de la teneur en lysine des matières azotées du grain, quelle que soit la fumure azotée et la teneur en protéines (P) des grains.

Chez les céréales d'origine tropicale (et nous avons considéré essentiellement le cas du Maïs), on note une dilution de la lysine dans les matières protéiques quand le taux de celles-ci augmente (fig. 4). Ce phénomène, observé chez un maïs cultivé dans l'essai de longue durée dont nous rapportons ici les résultats, est général : nous avons pu montrer, à partir d'un ensemble beaucoup plus important d'observations, qu'il existe chez tous les maïs à l'exception de certains mutants (*opaque* 2) (Decau et

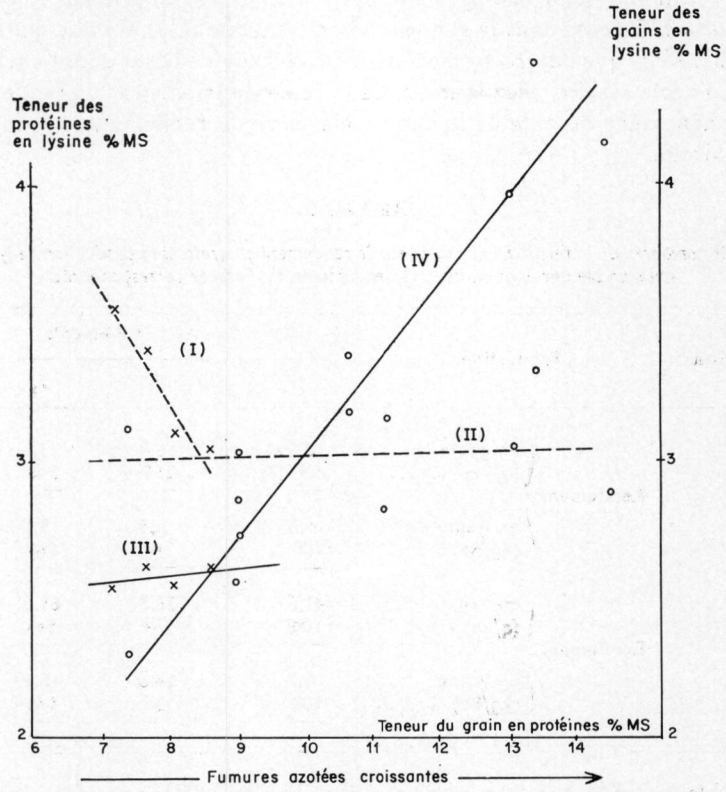


FIG. 4. — *Variations comparées des teneurs en lysine des protéines et du grain chez un maïs et un blé dur.*

x maïs
o Blé dur
---- Teneur des protéines en lysine
—— Teneur des grains en lysine

Pujol, 1974 ; Decau, 1975) des relations inverses, entre taux de lysine des protéines et apport d'azote d'une part, teneur en lysine et taux de matières azotées, d'autre part.

On peut attendre des résultats très comparables dans le cas des sorghos. En effet, sorghos et maïs renferment en abondance des prolamines pratiquement dépourvues de lysine (Mossé, 1966) tandis que les gliadines, prolamines des blés, contiennent 0,8 p. 100 environ de cet acide aminé.

L'enrichissement en protéines provoqué par la fumure azotée élève dans chaque cas le rapport prolamines/glutélines. Or ces dernières, riches en lysine, chez le Maïs et le Sorgho, en sont souvent peu pourvues chez le blé (Kaul, 1973). Il s'ensuit que la variation du rapport prolamines/glutélines a des incidences différentes sur les teneurs moyennes en lysine de la masse protéique du grain, chez les blés d'une part, chez le maïs et le sorgho d'autre part.

La stabilité ou la variabilité du taux de lysine des matières azotées (fig. 4, courbes I et II) quand augmente la teneur du grain en protéines, entraîne des variations ou au contraire se traduit par une stabilité de la teneur en lysine du grain (fig. 4, courbes III

et IV). Il s'ensuit une réponse à la fumure qui est différente chez le blé et le maïs analysés et qui se répercute dans le rendement en lysine (tabl. 3) et donc dans la qualité de la récolte. Alors que l'accroissement de la production de lysine sous l'effet d'apports croissants d'azote résulte, chez le maïs, de la seule augmentation du rendement, chez le blé, le phénomène découle de la double élévation du rendement et de la teneur en lysine du grain.

TABLEAU 3

Effets comparés de la fertilisation azotée sur le rendement en grain et la production de lysine chez un blé dur et un maïs. ((1) *Rendements*, (2) *Indices correspondants*)

Espèce cultivée	Production		Traitements			
			F_0	F_1	F_2	F_3
Blé dur	Rendement	en grain .... (q/ha)	6,6 (1) 100 (2)	16,8 255	23,0 348	29,6 448
		en lysine .... (kg/ha)	1,6 100	5,5 344	9,1 569	12,8 800
Maïs	Rendement	en grain .... (q/ha)	42,0 100	56,3 134	61,0 145	71,7 171
		en lysine .... (kg/ha)	10,7 100	14,8 138	15,6 146	18,7 175

Il semble toutefois que l'on ne puisse observer de différences dans la réponse à l'azote qui soient aussi marquées entre blés et céréales d'été quand on compare aux maïs les nouvelles variétés de blé très performantes : la teneur en lysine de protéines de ces dernières décroît en effet quand augmentent fumure, teneur en protéines et rendement (Kaul, 1973).

D. — Discussion

L'étude expérimentale que nous avons conduite a mis en évidence un fait important : l'application de fumures élevées, 150 kg ou même 210 kg d'azote par hectare, ne permet généralement pas d'atteindre une production plafond dans les conditions pédoclimatiques rencontrées et en utilisant les techniques culturales habituellement pratiquées. Nous nous efforcerons ici tout d'abord de mieux expliquer ce fait, ce qui nous amènera à envisager le bilan d'azote des cultures et à rapprocher ces données des seuils de rentabilité des fumures appliquées.

I. — *Réponse aux apports cumulés des fumures*

a) *Variation des rendements en grains.*

Les courbes de la figure 1 montrent que les rendements maximums de chacune des cultures successives ne peuvent être atteints avec les fumures appliquées.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce résultat.

1. *Efficacité limitée des fumures appliquées.*

Une évaluation de cette efficacité est obtenue en comparant les accroissements d'exportation d'azote, par rapport aux témoins, aux apports correspondants dus à la fumure.

De telles données, calculées pour l'ensemble des 10 années de culture et pour le traitement F_3, fournissent un rapport moyen de 25,3 p. 100. Le même calcul, pour la fumure la plus faible F_1 conduit à un résultat très voisin : 26,7 p. 100. Cependant la part de l'azote absorbé par les cultures et contribuant à la production protéique du grain est, dans tous les cas, élevée. Une faible part seulement de la fumure est donc utilisée. Ceci peut expliquer que les fumures F_1, F_2, F_3 ne permettent pas d'atteindre le rendement-plafond des cultures.

Nous nous efforcerons, dans une étude ultérieure, de rechercher les causes de cette faible efficacité des fumures apportées.

2. *Arrière-effet des fumures antérieures.*

L'utilisation de l'azote apporté étant très partielle, les cultures laisseront dans le sol des reliquats d'azote d'autant plus importants que l'application a été plus forte. Ainsi, après quatre années de culture, et si l'on ne tenait pas compte des pertes, le bilan azoté varierait de — 122 à 329 + 150 kg, auxquels s'ajouterait encore l'azote annuellement minéralisé par la matière organique du sol.

Le reliquat d'azote croissant après chaque culture, on peut donc attendre, au cours des campagnes agricoles successives, un élargissement de la gamme des disponibilités en azote offertes aux différentes spéculations céréalières, du traitement F_1 à F_3. Ceci peut donc contribuer en partie à expliquer que les réponses demeurent croissantes de F_1 à F_3.

Mais les résultats suggèrent aussi que la disponibilité de l'azote demeure très inférieure aux possibilités théoriques calculées (tabl. 4). En effet, si les quantités d'azote potentiellement disponibles étaient réellement offertes aux cultures, les rendements maximums seraient nécessairement atteints dans la gamme des traitements appliqués et l'on pourrait même atteindre, par suite d'un excès d'azote, des phénomènes d'intoxication susceptibles d'affecter le rendement. L'absence de tels phénomènes amène à conclure que l'azote théoriquement disponible n'est, en réalité, pas accessible aux racines, soit qu'il ait été entraîné hors du milieu sol par lessivage ou dénitrifié ou

TABLEAU 4

Reliquats d'azote laissés par les fumures

Nombre d'années de culture	Fumures apportées et reliquats (N kg/ha)				
4	Fumures	0	200	400	600
	Reliquats	— 122	+ 19	+ 193	+ 329
10	Fumures	0	600	1 200	1 800
	Reliquats	— 302	+ 139	+ 616	+ 1 043

perdu à l'état gazeux sous forme d'azote ammoniacal, soit qu'il ait été soumis à des phénomènes d'humification ou de rétrogradation. Mais l'utilisation de l'azote des fumures peut aussi être réduite si la croissance et le développement des plantes rencontrent des conditions défavorables.

3. *Influence des conditions climatiques.*

Les dix cultures successives ont été soumises à des conditions climatiques nécessairement diverses, susceptibles à priori d'agir sur la réponse à l'azote des différentes plantes. Celles-ci n'ont toutefois pas subi à proprement parler d'accident climatique (froid hivernal excessif, ennoyage, sécheresse exceptionnelle) mais seulement un déficit hydrique annuel d'été variable qui a pu affecter sorghos et maïs et dont l'intensité a été la plus grande en 1970 (tabl. 5).

TABLEAU 5

Déficit hydrique et production des différentes cultures d'été

Année	Culture	Déficit hydrique (m/m)	Accroissements moyens de rendement dus à la fumure (kg/ha par kg d'azote apporté)
1966	Sorgho	321,4	12,0
1968	Maïs	230,8	17,1
1970	Sorgho	442,3	8,7
1972	Sorgho	238,5	10,1
1974	Sorgho	245,7	12,6

Or, en 1970, le sorgho a fourni la réponse à la fumure la plus faible, comparée à celle des autres céréales d'été (tabl. 5), bien que les accroissements de rendement aient été plus que proportionnels aux fumures apportées. Une étude du comportement de cette culture nous a conduits à conclure à un effet favorable des fortes fertilisations azotées par le biais d'une accélération du cycle de la plante (épiaison, floraison) par rapport aux témoins, d'où un franchissement plus précoce de la phase critique, alors que le déficit hydrique est encore peu accusé (Decau *et al.*, 1971). Cet effet favorable indirect n'exclut pas un effet dépressif ultérieur de la sécheresse qui se manifeste ici au cours du grossissement du grain.

Toutefois ce phénomène particulier ne saurait expliquer toutes les relations rendement — fumure observées au cours des dix années d'expérimentation. Le devenir de l'azote des fumures dans le milieu sol doit donc être étudié.

b) *Variations des qualités protéiques des récoltes.*

L'examen d'ensemble des résultats fait apparaître une distorsion importante entre les effets des fumures cumulées sur le rendement en grain d'une part, sur la production de protéines d'autre part : tandis que la production totale de grain des dix années de culture double, de la culture sans fumure (F_0) à celle qui reçoit les plus forts apports (F_3), augmentant ainsi de 213 à 438 q/ha, la masse correspondante des

protéines produites s'accroît davantage, de 18,5 à 46,9 q/ha. La fumure azotée a provoqué un enrichissement moyen du grain en protéines : de 8,66 p. 100 en moyenne en l'absence de fumures, le taux de matières azotées a augmenté jusqu'à 10,71 p. 100. L'accroissement moyen de teneur, dans l'intervalle des fumures, a progressé de telle sorte que les quantités de protéines produites augmentent proportionnellement aux doses de fumure apportées.

Bien que les spéculations végétales envisagées aient surtout pour objectif la production d'amidon et l'utilisation principale de ce produit comme source d'énergie de la ration alimentaire, l'apport protéique par les céréales demeure important et son accroissement constitue un fait positif, au même titre que l'effet rendement de la fumure (Decau et Pujol, 1974).

Nous avons cultivé, dans cet essai de longue durée, des céréales (variétés classiques adaptées au milieu) assurant régulièrement une production moyenne mais non particulièrement aptes à une forte production protéique de qualité. L'amélioration de la réponse à l'azote, en ce qui concerne la qualité protéique de la production de l'assolement céréalier, peut être envisagée par l'introduction de variétés de céréales plus aptes à produire des grains à haute teneur en protéines (Johnson *et al.*, 1972) ou à qualités protéiques améliorées (Mertz *et al.*, 1964 ; Singh et Aktell, 1973). Toutefois la réponse quantitative de la variété à qualité améliorée ne doit pas s'en trouver diminuée (Decau, 1970 ; Stroike et Johnson, 1972).

Une autre voie d'amélioration peut résider dans la rupture de la succession céréalière par introduction d'une légumineuse. On peut attendre en outre de cette solution un effet favorable sur le bilan azoté de la rotation.

II. — *Bilan d'azote et seuil de rentabilité des fumures*

Dans les courbes de réponse des cultures à la fertilisation, il faut noter deux niveaux caractéristiques :

— le point d'équilibre entre apports et exportations,

— le niveau limite correspondant à l'optimisation économique de l'apport engrais.

Nous envisagerons seulement ici la rentabilité dans la production quantitative du grain, examinant tout d'abord les cas théoriques possibles puis les données expérimentales.

A) *Situations théoriques possibles.*

Trois situations peuvent être rencontrées selon que le niveau de la fumure permettant d'atteindre le seuil de rentabilité est inférieur, égal ou supérieur à celui qui permet d'assurer l'équilibre entre les apports et les exportations.

Nous avons représenté sur la figure 5 les trois cas possibles (A, B, C), en admettant, conventionnellement, la validité générale des relations suivantes, établies à partir des résultats expérimentaux moyens obtenus :

1) Relation linéaire entre azote exporté (N_e) (q/ha) et azote apporté (N_a) (q/ha) :

$$N_e = aN_a + 30,$$

soit une exportation d'azote de 30 kg /ha en l'absence d'apport, valeur très proche des données expérimentales.

2) Relation entre teneur en azote du grain et N apporté :

$$N\ p.\ 1\ 000 = 0{,}144\ 10^{-4} N^2_a + 0{,}48\ 10^{-4} N_a + 1{,}39$$

équation également proche des valeurs expérimentales et qui traduit un cas d'enrichissement du grain en azote plus que proportionnel aux apports de fumure.

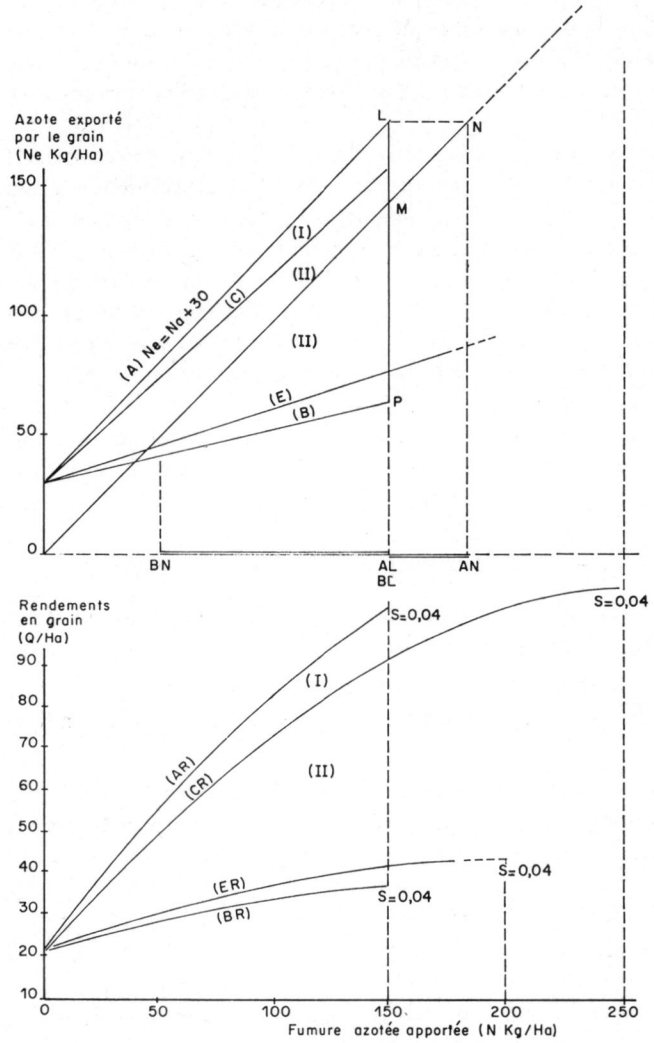


FIG. 5. — *Equilibre azoté* (apport et exportation N) *et seuils de rentabilité des fumures.*

a) *Efficacité très élevée de la fertilisation apportée.*

Le cas limite est celui de l'utilisation intégrale de l'azote apporté pour la production de grain et pour l'exportation sous forme de protéines (courbe A de la fig. 5). L'exportation d'azote croît alors linéairement ($a = 1$) avec les apports jusqu'à une

limite (L) que détermine l'intervention du premier facteur limitant qui peut être endogène (propre au couvert végétal) ou extérieur (eau, lumière, facteurs trophiques divers).

La variation correspondante du rendement est curvilinéaire (courbe A_R). Au point L de la courbe A correspond un maximum qui se confond ici avec l'optimum (avec un seuil de rentabilité de 0,04 q de grain par kg d'azote apporté). Dans ce cas, le bilan apport-exportation est négatif (segment LM) : le milieu s'appauvrit en azote quand on apporte la fumure assurant le rendement optimal.

b) *Efficacité faible de la fertilisation apportée.*

Le deuxième cas de figure est celui que décrit la courbe (B) d'équation $N_e = 0{,}23\ N_a + 30$. Celle-ci représente en fait un deuxième cas limite : l'accroissement d'absorption d'azote est ici le minimum compatible avec un seuil de rentabilité du rendement en grain de 150 kgN/ha, condition que nous avons imposée à la courbe B_R.

Dans ces conditions, la fumure assurant l'équilibre azoté est très inférieure à celle qui permet d'atteindre le seuil de rentabilité des apports (segment BN AL). Par ailleurs, la fumure permettant d'atteindre le rendement optimum laisse ici dans le milieu un reliquat d'azote non utilisé pour l'alimentation du grain.

c) *Cas limite.*

Entre les deux situations précédentes se place l'état d'équilibre où fumures optimales pour les rendements et pour l'équilibre azoté du milieu se trouvent confondues ; les courbes C et C_R délimitent deux zones, (I) et (II), dans lesquelles l'équilibre du bilan d'azote est atteint pour des fumures respectivement supérieures ou inférieures à l'optimum, et pour lesquelles ce niveau de fumure crée dans le milieu un déficit ou laisse au contraire un reliquat d'azote.

B) *Relations expérimentales observées.*

Les différentes cultures successives de notre essai se situent dans la zone II de la figure. En effet :

1) Les fumures apportées entraînent, chez la plupart des cultures, des variations de production relativement faibles mais demeurant positives et le plus souvent rentables dans toute la gamme d'application. Ainsi, un calcul appliqué à l'ensemble des réponses à l'azote des dix cultures successives conduit à noter (fig. 5, courbe E_R), que l'application des fumures demeure rentable jusqu'à un apport moyen de 200 kg d'azote par hectare et par an.

2) La comparaison des exportations d'azote aux apports azotés correspondants met en évidence le niveau très faible des fumures nécessaires pour assurer l'équilibre apports-exportations. Tel est le cas pour l'ensemble des cultures de l'essai pour lesquelles l'équilibre est atteint pour des fumures en moyenne de l'ordre de 50 kg/ha (fig. 5). Dans ces conditions, il est donc nécessaire d'apporter une quantité d'azote beaucoup plus importante que celle qui entre dans la constitution des protéines exportées pour atteindre le maximum de production rentable.

Conclusions

En assolement céréalier, sur un sol argilo-calcaire typique du Sud-Ouest de la France, nous avons observé qu'un apport annuel d'azote sous forme d'ammonitrate de 50 à 150 kg/ha, ou de 70 à 210 kg/ha dont 1/3 environ lors de l'enfouissement des pailles et le reste au début ou au cours du cycle de la culture, ne permet pas d'atteindre le rendement maximum des spéculations végétales expérimentées, blé tendre, blé dur, maïs, sorgho, ni, le plus souvent, le niveau de l'optimum économique des apports.

L'étude comparée des qualités protéiques du grain d'une céréale d'hiver d'une part, d'un maïs d'autre part, a montré le comportement fondamentalement différents des deux types de spéculations dans leur réponse à l'azote : variations de sens différent des teneurs en protéines et du taux de lysine des matières azotées quand augmente la fumure.

Toutefois l'observation la plus importante réside dans la faible réponse des différentes cultures à la fertilisation en ce qui concerne la production de grain. On note ainsi, quelle que soit la culture, qu'une faible partie seulement de l'azote apporté (25 p. 100) a contribué à la production protéique du grain. Il en résulte un écart considérable entre le niveau des apports assurant l'équilibre du bilan azoté des cultures et les doses des fumures optimales, de sorte que celles-ci laissent dans le milieu d'importants reliquats d'azote dont il importera de rechercher le devenir.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Jolivet (Laboratoire d'Etude du Métabolisme intermédiaire et de Nutrition minérale, Physiologie Végétale, I.N.R.A. Versailles) et M. Rémy (Station Agronomique de Laon I.N.R.A.), lecteurs du projet, pour leur contribution à la présentation et à la rédaction du présent mémoire, ainsi que MM. Bouche et Casalis (S.P.I.E.A.) pour leur soutien à ces travaux.

Summary

Effects of different quantities of nitrogen fertilisers in rotational cereal cropping in the South-West of France

1. — *Production of grains and proteins*

Four quantities of nitrogen fertilisers (0, 50, 100, 150 kg nitrogen/ha, 1966-1970, and 0, 70, 140, 210 kg/ha 1971-1975) have been applied to a conventional biennial rotational cereal cropping in the Lauragais, a region of the South-West of France with argilaceous/calcareous soil.

The grain yields, the protein content and in some cases the protein quality (lysin content) have been measured.

The grain yields varied from 6 to 44 q/ha for wheats, from 23 to 59 q/ha for sorghums and from 42 to 72 q/ha for maizes. They continuously increased during the whole interval of each tested fertilization.

Moreover the quantity of produced proteins increased in a linear way with the utilized fertiliser. The difference of the grain protein content depends on the species cultivated and the fertiliser. There is a negative correlation between protein content and the yield for all species and a very often positive effect of fertilization.

The protein quality, measured by the grain lysin content, is higher and more variable according to the fertiliser in a species with limited grain yield (hard wheat) than in a maize with high yield.

Whatever the crop however the rentability threshold of fertilisers is much higher than the quantities required for compensating fertilizer losses. As a result the utilization factor is very low (25 p. 100) and thereby raises the problems of the becoming of these excess quantities.

Zusammenfassung

Auswirkungen verschiedener Mengen Stickstoffdüngung bei der Getreidewechselwirtschaft im Südwesten Frankreichs

1. — *Korn- und Proteinproduktion*

Vier verschiedene Mengen Stickstoffdûngung (0, 50, 100, 150 kg Stickstoff/ha, 1966-1970, und 0, 70, 140, 210 kg/ha, 1971-1975) wurden bei einer üblichen zweijährigen Getreidewechsel-wirtschaft angewendet, und zwar im Lauragais, auf dem ton- und kalkhaltigen Boden Sudwestfrankreichs.

Die Kornerträge, der jeweilige Proteingehalt und in einigen Fällen auch die Qualität der Proteine (Gehalt an Lysin) wurden gemessen.

Die Kornerträge variierten zwischen 6 und 44 q/ha beim Weizen, zwischen 23 und 59 q/ha bei der Sorghumhirse und zwischen 42 und 72 q/ha beim Mais. Der Anstieg erfolgte meist gleichmässig während des ganzen Zeitabschnitts der jeweils erprobten Düngung. Ausserdem ergab sich eine lineare Mengenerhöhung an erzeugten Proteinen je nach eingesetzter Düngung.

Der Proteingehalt des Korns ist je nach angebauter Art und angewandter Düngung verschieden.

Bemerkenswert ist bei allen Arten die negative Wechselbeziehung zwischen Proteingehalt und Ertrag sowie die meist positive Auswirkung des Düngens.

Die Proteinqualität, die anhand des Lysingehalts des Getreides gemessen wird, ist bei einer Art mit beschränktem Kornertrag (Hartweizen) besser und mehr von der Düngung abhängig als bei Mais mit hoher Produktion.

Bei allen Kulturen liegt jedoch die Rentabilitätsschwelle mengenmässig viel höher als für den Ausgleich der Verluste nötig. Der Verwertungskoeffizient ist infolgedessen sehr schwach (25 p. 100) und wirft auf längere Sicht das Problem auf, was mit diesen angehäuften Uberschüssen geschehen soll.

РЕЗЮМЕ

Эффект различных уровней азотного удобрения в злаковом севообороте на юго-западе Франции.

1. Продукция зерна и протеинов.

Ж. ДЕКО, М. КОМБЕР, Б. ПЮЖОЛЬ.

В двухгодовом классическом злаковом севообороте, в провинции Лораге, на глинисто-известковой почве юго-запада Франции, применялись четыре разных уровня азотных удобрений : 0, 50, 100, 150 кг азота/га (с 1966, по 1970), и, затем 0, 70, 140, 210 кг азота/га (с 1970, по 1975). Определялись : урожай зерна, содержание в нем протеинов и, в некоторых случаях, качество этих последних (по содержанию в нем лизина).

Урожаи зерна колебались от 6 до 44 цент./га в случае пшеницы, от 23 до 59 цент./га при культуре сорго, от 42 до 72 цент./га для кукурузы, и постоянно увеличивались во всем интервалле испытанных доз удобрения. Кроме того, количество полученных протеинов линейно увеличивалось с увеличением доз удобрения.

Содержание протеинов в зерне изменялось в зависимости от возделывавнегося вида и от удобрения : отмечено было существование отрицательной корреляции между содержанием протеинов и урожайностью, для всех испытанных видов и, чаще всего, положительного эффекта удобрения. Качество протеина, оценивавшееся по содержанию лизина в зерне, улучшалось и было более изменчивым в зависимости от удобрения, у видов с ограниченной урожайностью зерна (твердая пшеница), чем например, у высоко-продуктивной кукурузы.

Для всех испытанных культур порог рентабельности удобрения находился на гораздо более высоком уровне, чем количество удобрения необходимое для компенсации выноса. Поэтому коеффициент потребения этого удобрения очень невелик (25 р. 100), и ставит проблему последействия накопившихся излишков.

Références bibliographiques

BLANCHET R., BOSC M., MAERTENS C., GELFI N., CABELGUENNE M., 1968. Quelques caractères physico-chimiques de sols-types de la Région toulousaine ; conséquences agronomiques. Brochure à diffusion régionale.

DECAU J., 1970. Effets comparés de l'irrigation et de la fumure azotée sur les productions qualitative et quantitative de maïs de variétés différentes. I. Rendement en grain. *Ann. agron.* **21** (4), 335-349.

DECAU J., 1975. Potential of new Varieties of Cereals in regard to Improvement of Protein Quality in Response to Fertilization. *Proc. 11th. Coll. International Potash Institute* Bornholm, Denmark, 277-285.

DECAU J., CASALIS Ph., COMBRET M., PUJOL B., 1971. Réaction du Sorgho-grain à la fumure azotée en culture sèche. Résultats d'un essai sur sol argilo-calcaire dans la Région toulousaine. *C. R. Acad. Agric.* France, 1616-1626.

DECAU J., FIORAMONTI S., MALTERRE H., 1962. Teneurs des sols de la Haute-Garonne en matières organiques. *Ann. agron.* **13** (4), 347-352.

DECAU J., PUJOL B., 1974. Effets comparés de l'irrigation et de la fumure azotée sur les productions qualitative et quantitative de maïs de variétés différentes. III. Qualité protéique et valeur des récoltes. *Ann. agron.* **25** (1), 93-111.

JOHNSON V. A., MATTERN P. J., SCHMIDT J. W., 1972. Wheat protein improvement. Rice breeding. *Los banos Laguna Philippines Symp. Proc.*, 407-418.

KAUL A. K., 1973. Mutation breeding and crop proteins improvement in nuclear techniques for seed protein improvement. Intern. Atomic Energy Agency, Vienne, 1-106.

MAERTENS C., PUECH J., RELLIER J. P., 1974. Influence de la nature des sols et de leur exploration racinaire sur l'évolution des profils hydriques. *Xth International Symposium of « Agrochimica ». Water in Agriculture*, Bari, 20-24 May 1974.

MERTZ E. T., BATES L. S., NELSON O. E., 1964. Mutant gene that changes protein composition and increases lysin content of maize endosperm. *Science*, **145,** 279-280.

MOSSÉ J., 1966. Alcohol soluble proteins of cereal grains. *Fed. Proc.* **25,** 1663-1669.

SINGH R., AKTELL J. D., 1973. High Lysin mutant gene (hl) that improves protein quality and biological value of grain sorghum. *Crop Sci.*, **13,** 535-539.

STROIKE J. E., JOHNSON V. A., 1972. Winter cultivar performances in an international array of environments. *Research Bulletin Univ. of Nebraska. Agricultural Experiment Station*, **251,** 1-48.

Ann. agron., 1977, **28** (3), 329-333.

NOTE ANALYTIQUE

Dosage par la méthode Kjeldahl des nitrates contenus dans les sols et les végétaux

G. GUIRAUD et J.-C. FARDEAU

avec la collaboration technique de Gisèle LLIMOUS et Marie-Andrée BARRAL

Département de Biologie, Service de Radioagronomie, C.E.N. Cadarache
B.P. n° 1, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance

Résumé

Lors des analyses d'azote total par la méthode Kjeldahl, les nitrates présents dans un échantillon de sol ou de végétal ne sont dosés que partiellement. L'addition de nitrate marqué a permis de confirmer cette hypothèse.

En utilisant le même procédé, il est démontré que la réduction préalable par le fer réduit en milieu sulfurique dilué conduit à un dosage quantitatif tant sur le plan chimique que sur le plan du bilan isotopique. Cette technique très simple est donc à recommander chaque fois que l'on soupçonne la présence d'une quantité notable d'azote nitrique dans les sols ou les végétaux.

Introduction

Le dosage de l'azote total contenu dans les sols et les végétaux se fait généralement suivant la méthode Kjeldahl. Cependant on reproche couramment à cette méthode de ne pas inclure, ou tout au moins d'inclure partiellement, les nitrates présents (Bremner, 1965). Ceci peut conduire à une surestimation des pertes d'azote dans les études de bilan (Hauck, 1968). De même, pour les sols contenant de grandes quantités de nitrates, la valeur de l'azote total peut être affectée (Goh, 1972).

Parmi les méthodes destinées à prendre en compte les nitrates lors du dosage de l'azote total, on peut citer trois modifications déjà anciennes de la méthode Kjeldahl classique : la méthode de réduction alcaline (Davidson et Parsons, 1919), la méthode à l'acide salicylique (Cope, 1916) et la méthode au permanganate-fer réduit (Olsen, 1929). Toutes consistent en une réduction des nitrates présents dans l'échantillon avant la minéralisation en milieu sulfurique. Le but de cette note est de contrôler, à l'aide de nitrates marqués à l'azote 15, l'utilité et l'efficacité de cette réduction préalable lors d'un dosage d'azote total (1).

(1) Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'action urgente DGRST « Evolution de l'azote des engrais dans les sols cultivés, Utilisation de l'azote 15 » (Décision d'aide n° 72, 7 0674).

La méthode de réduction alcaline a été jugée trop fastidieuse tandis que la méthode à l'acide salicylique n'a pas donné, à l'usage, entière satisfaction.

On s'est donc limité, pour sa facilité de mise en œuvre, à une simplification de la méthode Olsen en n'utilisant pas l'oxydation permanganique destinée surtout à prendre en compte les nitrites. Rappelons que la méthode Olsen est utilisée pour le dosage de l'azote total des engrais (norme AFNOR U 42-119).

Matériel et méthodes

L'étude a porté sur des échantillons variés de sol (contenant de 0,2 p. 1 000 à 2 p. 100 d'azote total) et de végétaux dont certains sont riches en azote (ray-grass en contenant 5 p. 100) et d'autres plus pauvres (paille en contenant 0,5 p. 100).

A ces échantillons broyés à 0,1 mm, on a ajouté de 10 à 50 ppm pour les sols et jusqu'à 1 p. 100, pour les végétaux, de nitrate de calcium marqué à 30 p. 100 de ^{15}N.

Kjeldahl classique

On place l'échantillon dans un matras avec environ 3 g de catalyseur (mélange de sélénium, $CuSO_4$ et K_2SO_4 dans la proportion 2-5-10). On ajoute les nitrates marqués et 10 ml d'acide sulfurique concentré p.a. Merck. On chauffe doucement sur calotte chauffante électrique pendant une heure et ensuite à ébullition jusqu'à clarification complète (4 h environ).

Kjeldahl Olsen

On prend l'échantillon auquel on ajoute 1 g de fer réduit et 20 ml d'acide sulfurique 12 N (acide concentré dilué au 1/3 environ). On chauffe lentement jusqu'à très douce ébullition qu'on maintient pour chasser l'eau, pendant 1 h. On laisse refroidir et on ajoute 3 g de catalyseur et 5 ml d'acide concentré. On chauffe à nouveau jusqu'à clarification (4 h environ).

On effectue ensuite le dosage chimique par retour avec de l'acide sulfurique N/10 ainsi que l'analyse isotopique (Guiraud, 1973).

Résultats et discussion

1. — *Dosage de l'azote nitrique dans les végétaux*

En récoltant un ray-grass assez jeune (3 semaines) et alimenté en milieu fortement nitrique, on a pu obtenir une substance contenant 1,48 p. 100 M.S. d'azote nitrique. Dans ce cas, le dosage Kjeldahl classique donne un pourcentage d'azote total de 4,94 p. 100 M.S. alors que la méthode Olsen conduit à des résultats significativement supérieurs : 5,22 p. 100. Cependant, on ne peut pas conclure car l'on ne retrouve pas l'écart présumé de 1,48.

Par la méthode des ajouts marqués, on peut noter (tabl. 1) que la méthode Olsen récupère la quasi totalité (96 p. 100) de l'azote 15 introduit, même pour des quantités de nitrates importantes (jusqu'à près de la moitié de la quantité d'azote total). Par contre, la technique classique ne récupère que partiellement l'azote nitrique et ceci

TABLEAU 1

Comparaison des deux méthodes Kjeldahl (classique et Olsen) pour le dosage de l'azote du ray-grass
(Addition à 100 mg de matière sèche de 1 à 5 ml d'une solution de Ca $(NO_3)_2$ contenant 202 µg N/ml avec un excès en azote 15 de 31,51 p. 100)

Méthode	Quantité d'azote nitrique ajoutée en mg	Quantité d'azote total dosée en mg pour 100 mg M. S.	Excès isotopique	Récupération en p. 100 de la quantité de ^{15}N ajoutée
Kjeldahl classique	0	4,94	—	—
	0,2	4,95	0,875	68
	0,4	4,96	1,66	65
	0,6	4,77	2,17	54
	0,8	4,84	2,76	52
	1	5,1	2,94	47
Kjeldhal Olsen	0	5,22	—	—
	0,2	5,29	1,14	95
	0,4	5,28	2,31	96
	0,6	5,36	3,38	95
	0,8	6,04	4,09	97
	1	6,22	4,94	96

TABLEAU 2

Variation de la quantité d'azote 15 *récupérée par Kjeldahl classique en fonction de la quantité de nitrate ajoutée*
(Addition à 5 g de sol de 1 à 5 ml d'une solution de $Ca(NO_3)_2$ contenant 48,5 µgN/ml avec un excès de 32,47 p. 100 en azote 15)

Quantité d'azote nitrique ajoutée		Sol brun acide	Andosol 733 (Le Bouchet)	Sol brun calcaire	Sol ferrugineux tropical dégradé
0	Azote total en ppm	1 410	3 030	1 080	176
10 ppm	Azote total en ppm	1 430	2 980	1 060	174
	Excès isotopique	0,222	0,101	0,244	1,711
	p. 100 de la quantité de ^{15}N ajoutée	101	96	83	95
20 ppm	Azote	1 430	3 030	1 080	190
	Excès	0,417	0,200	0,428	2,79
	p. 100	95	96	74	84
30 ppm	Azote	1 440	3 050	1 070	178
	Excès	0,656	0,298	0,536	4,26
	p. 100	100	96	61	81
40 ppm	Azote	1 440	3 060	1 070	210
	Excès	0,842	0,396	0,717	5,50
	p. 100	96	97	61	92
50 ppm	Azote	1 440	3 010	1 080	210
	Excès	0,999	0,518	0,856	6,54
	p. 100	92	99	59	87

d'autant moins que les nitrates sont plus abondants. Cette prise en compte partielle est due aux conditions réductrices existant en début de minéralisation. Ainsi, on a pu doser jusqu'à 86 p. 100 de nitrates marqués ajoutés, à raison de 0,2 p. 100, à de la paille qui n'en contenait pas au préalable.

2. — *Dosage de l'azote nitrique dans les sols*

Après avoir ajouté de 10 à 50 ppm d'azote nitrique marqué, quantités analogues à celles rencontrées dans les sols, on peut voir (tableau 2) que la récupération de l'azote 15 est très variable. On retrouve donc le même phénomène que pour les plantes mais moins accusé car la proportion d'azote nitrique par rapport à l'azote organique est plus faible. De ce fait, le dosage classique est « presque quantitatif » sur le plan chimique. Le bilan isotopique, par contre, est nettement déficitaire et montre qu'il faut utiliser la réduction préalable par le fer qui conduit à une récupération totale de l'azote 15 nitrique ajouté.

Conclusion

Du fait de la présence de matière organique et aussi peut être de fer jouant le rôle de réducteur, l'analyse de l'azote total des sols et des végétaux par la méthode Kjeldahl conduit toujours à une récupération tout au moins partielle des nitrates présents, à condition toutefois que l'attaque sulfurique soit conduite très lentement. Dans la majorité des cas, cette méthode est suffisante pour déterminer avec une bonne précision la quantité d'azote total. Par contre, dans certains sols (sols tropicaux par exemple) ou dans les jeunes végétaux ayant reçu une alimentation azotée essentiellement nitrique, la réduction préalable des nitrates par le fer en milieu sulfurique dilué (méthode Olsen) est nécessaire et conduit à de bons résultats comme l'ont montré les analyses effectuées avec l'aide des isotopes. Cette réduction préalable est indispensable dans le cas d'utilisation de traceur et plus spécialement de nitrates marqués à l'azote 15 car la plus grande partie de l'isotope est susceptible d'être sous cette forme ; ce dosage quantitatif de l'azote nitrique évite alors de considérables défauts de bilan qui entraînent des erreurs d'interprétation dans les résultats.

Reçu pour publication en avril 1977.

Remerciements

Nous remercions vivement MM. Rémy et Bellenand-Mayeur (respectivement Stations d'agronomie I.N.R.A. de Laon et d'Antibes) des conseils et critiques qu'ils nous ont apportés.

Summary

Analytical note

The determination of nitrates in soils and plants by the Kjeldahl method

When the total nitrogen is analysed by the Kjeldahl method the nitrates present in a soil or plant sample are titrated only in part. Adding labelled nitrates allowed to check this hypothesis with certitude. Using the same way it is shown that the previous reduction by reduced iron in diluted sulfuric acid leads to a quantitative chemical as well as isotopic determination. This very simple technique is to be used every time that the presence of a great amount of nitric nitrogen is likely to be found in soils and plants.

Zusammenfassung

Organisation und Mineralisation von Stickstoff in kalkoboden
Untersuchung and Hand von Stickstoff 15

Eine Bodenprobe wurde 18 Monate lang mit N 15 markiertem Kalziumnitrat, mit oder ohne Strohbeigabe oder mit markiertem Raygras bebrütet. Die Beifügung des Spurenelements unter die organischen Stoffe wurde vor und nach einer Raygraskultur gemessen. Ohne organische Masse hat sich das beigegebene Nitrat bei der Inkubation nur schwach mit dem Boden verbunden. Man konnte jedoch erhebliche Verluste auf Grund der Entnitrifikation beobachten sowie eine Mineralisation des organischen Stickstoffs.

Bei Strohzugabe erreicht die Verwertung des beigefugten mineralischen Stickstoffs 30 p. 100. Die Verluste sind geringer, was auch der Fall ist, wenn das Spurenelement in organischer Form beigemengt wird. Das Spurenelement wird hauptsächlich im Aminosäuren zugehörigen Teil den organischen Stoffen beigemengt.

Beim Anbau liegt der Verwertungskoeffizient zwischen 30 und 70 p. 100, und bei fast völligem Verschwinden des mineralischen Stickstoffs tritt eine Verminderung des gesamten Stickstoffs und des Stickstoffs 15 ein in den verschiedenen organischen Fraktionen, die eine konstantes sotopisches Ubermass beibehalten.

РЕЗЮМЕ

Дозировка нитратов в почве и растениях, при помощи метода Кьельдаля.

ГИРО Г., ФАРДО Ж. К.

Дозировка нитратов в образцах почвы, или растений, при анализах этих образцов с помощью метода Кьельдаля, -частична, и прибавление меченного нитрата позволило подтвердить эту гипотезу.

Применяя тот-же способ, доказывается, что предварительнал редукция с помощью железа восстановленного в разбавленной кислой среде, дает более точный количественный анализ, как с точки зрения химической, так и изотопной. Эту, очень простую технологию можно, значит, рекоммендовать в случаях когда предполагается существование значительных количеств нитратного азота в почве, или растениях.

Références bibliographiques

BREMNER J. M., 1965. Total nitrogen in *Methods of soil analysis*. BLACK C. A. *et al.*, American Society of Agronomy, Inc., Publisher. Madison, Wisconsin, USA, 1154.

COPE W. C., 1916. Kjeldahl modification for determination of nitrogen in nitro substitution compounds. *J. Ind. Eng. Chem.* **8**, 592-593.

DAVIDSON B. S. et PARSONS J. T., 1919. The determination of total nitrogen including nitric nitrogen. *J. Ind. Eng. Chem.* **11**, 306-311.

GOH K. M., 1972. Comparison and evaluation of methods for including nitrate in the total nitrogen determination of soils. *J. Sci. Ed. Agric.* **23**, 275-284.

GUIRAUD G., PACCHIANI L., 1973. Acquisition et traitement en temps réel de données numériques d'analyses isotopiques d'azote par spectrométrie de masse. *Analusis* **2** (4), 282-286.

HAUCK R. D., 1968. Soil and fertilizer nitrogen. A review of recent work and commentary. *Int. Congr. Soil Sci.*, **2**, 475-486.

OLSEN C., 1929. On the determination of nitrogen in soils. *Compt. Rend. Trav., Lab. Carlsberg*, **17**, 3.

Norme AFNOR U 42-119, 1965. Engrais azoté de classe C. Dosage de l'azote : I/dosage de l'azote total.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, desssins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

annales agronomiques

Bimestriel

1977

Vol. 28. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1977, **28** (4), 335-359.

Etude comparative de la dynamique du drainage et de la composition des eaux de percolation dans les sols granitiques et basaltiques du Massif central. Résultats de 15 ans d'observation en cases de végétation dans les conditions climatiques du bassin limagnais

J. DEJOU et J. MORIZET

avec la collaboration technique de G. BAUCHER, Renée DEGOUTTE et R. DELPY

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I.N.R.A.,
12, *avenue de l'Agriculture*
63100 *Clermont-Ferrand*

Résumé

La dynamique du drainage, la composition des eaux de percolation et les exportations des principaux éléments chimiques ont été étudiés en cases de végétation contenant un sol granitique et un sol basaltique placés dans les conditions climatiques du bassin de la Limagne de Clermont-Ferrand, où la normale de la pluviométrie annuelle est de 570 mm. L'expérimentation s'est déroulée sur une période de 15 ans. Les principaux résultats acquis peuvent être ainsi résumés :

Dans les deux catégories de sols, le drainage est irrégulier et fonction de la pluviométrie de l'année, mais aussi de la culture plus ou moins grande consommatrice d'eau ; de plus, il s'avère très faible, particulièrement dans le cas des sols basaltiques.

Les différents constituants des eaux de drainage peuvent être classés en deux catégories suivant leur origine :

a) ceux qui dérivent à la fois du sol et de la fertilisation : Si, Na, Mg ;

b) ceux qui dérivent presque exclusivement de la fertilisation : P, Ca, K, N, S, Cl.

Du fait des fumures, les concentrations des eaux sont dans l'ensemble plus riches que celles des eaux naturelles du Massif Central.

Les exportations des éléments minéraux par les eaux de drainage sont relativement peu importantes, surtout en domaine basaltique.

Enfin, la composition des eaux de drainage est en équilibre avec la genèse des minéraux argileux 2/1 dans les sols granitiques ; la proportion d'allophanes se révélant très forte dans les sols basaltiques, cet équilibre est moins net dans ce type de sol.

I. — Introduction

Depuis 1951, la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand est dotée sur son domaine de Mon Désir d'un dispositif de 24 cases de végétation. Jusqu'en 1961, elles

TABLEAU 1

Analyses des matériaux de chargement des cases de Mon Désir à Clermont-Ferrand (en p. 100 de terre fine séchée)

Nature des sols	Profondeur (en cm)	Horizon	Granulométrie					Matière organique	CEC me/100 g	Bases échang. me/100 g				S/T	P_2O_5 Dyer p. 1 000	K_2O éch. p. 1 000	pH eau
			< 2 µ	2-20 µ	20-50 µ	50-200 µ	200-2 000 µ			Ca	Mg	K	Na				
N° 3-15 Granitiques	0-20	A11	13,7	10,2	7,0	12,4	46,4	2,7	9,2	7,0	1,0	0,6	0,05	94,0	0,19	0,15	5,8
	20-40	A12	13,5	9,8	6,7	12,2	49,1	1,1	6,5	4,5	0,6	0,3	0,04	86,7	0,11	0,06	6,0
	40-85	AC	9,2	7,7	4,7	8,8	65,6	0,6	6,6	4,9	0,7	0,19	0,06	88,5	0,11	0,05	6,5
	85-145	C	6,7	5,7	4,4	12,5	67,0	0,2	7,7	4,7	1,3	0,07	0,04	79,3	0,17	0,003	5,8
N° 2-14	0-20	A	8,5	21,0	15,4	10,6	20,8	9,4	32,4	4,8	2,5	0,90	0,03	22,3	0,30	0,21	6,7
Basaltiques	20-85	AC	5,3	14,5	9,3	18,4	30,6	5,9	32,5	4,0	0,76	0,06	0,03	14,9	0,24	0,03	6,5

Remarques.

a) Origine du sol granitique : Condat Les Monboisier (Puy-de-Dôme).
Origine du sol basaltique : Fonsalive — Commune de Saulzet-le-Froid (Puy-de-Dôme).
Le sol basaltique repose sur 60 cm de graviers granitiques de la Dore de 85 à 145 cm.
b) La superficie de chaque case est de 2 m².
c) Réserve en eau des sols granitiques : 180 mm.
— des sols basaltiques : 210 mm.

furent toutes uniquement occupées par des sols argilo-calcaires de Limagne, de profondeur différente. Le dispositif a été décrit par Collier et Robelin (1959), et sa mise en place était destinée à tester les aptitudes culturales de ces sols grâce à l'installation de cultures successives, ainsi que leurs caractéristiques lysimétriques dans les conditions climatiques de la plaine limagnaise. Les résultats ont été exposés dans plusieurs publications par Collier *et al.* (1956 à 1961).

A partir de 1961, 4 cases furent déchargées ; deux d'entre elles furent remplies par un sol granitique de 85 cm de profondeur reposant sur 60 cm d'arène ; deux autres reçurent un sol basaltique de même profondeur placé sur 60 cm de graviers granitiques de la Dore ; ainsi la profondeur totale, 145 cm, était la même dans ce nouveau dispositif, établi de cette manière pour réaliser approximativement la même capacité globale de rétention pour l'eau.

Les analyses granulométriques et chimiques de ces matériaux sont consignées dans le tableau 1. L'estimation des réserves en eau dans les deux catégories de sols a été effectuée à partir des profils hydriques obtenus à l'aide de l'humidimètre à neutrons ; elles sont élevées : 180 mm et 210 mm, respectivement pour les cases granitiques et basaltiques ; ceci résulte de la profondeur des profils et, pour les sols basaltiques, de la teneur élevée en matière organique.

Compte tenu de l'importance considérable des sols granitiques et basaltiques dans le Massif Central, cette installation nouvelle était parfaitement justifiée. Sa finalité restait d'ailleurs la même que pour les sols argilo-calcaires : d'une part, analyser les potentialités agronomiques de ces sols granitiques et basaltiques recevant les mêmes cultures et les comparer aux précédents dans des conditions climatiques identiques, (voir tabl. 2) et d'autre part obtenir des références sur la dynamique du drainage,

TABLEAU 2

Données climatiques à Mon Désir

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuelle
Pluviométrie en mm													
Moyenne mensuelle, 1961-1975.	32,1	27,6	25,8	44,8	86,2	69,1	50,1	76,7	58,8	43,6	42,5	27,6	584,9
Normale, 1929-1975	26,5	27,0	27,1	41,1	74,1	72,4	48,6	70,1	60,1	46,2	40,3	31,2	564,7
Température en °C													
Moyenne mensuelle, 1961-1975	3,3	4,2	6,7	10,2	13,6	16,8	19,2	18,8	16,3	11,8	7,1	2,5	10,9
Normale, 1929-1975	3,2	4,5	7,3	10,3	13,7	17,0	19,2	18,8	16,2	11,6	7,1	3,5	11,0

la composition des eaux de percolation et les exportations des principaux éléments chimiques. C'est ce second objectif qui retiendra ici notre attention. Mais il faut souligner que les résultats constatés ne peuvent être transposés en l'état aux régions granitiques et basaltiques du Massif Central, toutes situées à des altitudes plus élevées et soumises ainsi à des conditions climatiques différentes.

TABLEAU 3

Cases granitiques et basaltiques de Mon Désir (1961-1975)
Succession des cultures et fumures appliquées

Année	Culture	Rendements moyens en q/ha-MS		Fumure organique et fumure minérale en kg/ha								
		Sol gran.	Sol basalt.	Forme appliquée	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Na_2O	S	Cl
1961	Pas de culture											
1962	Blé Magdalena	45,9	7,0	Ammonitrate 20 p. 100 Super 16 p. 100 KCl 60 p. 100	75	100	150	265	1,4	5,0	75	120,5
1963	Ail	21,0	9,3	Sulfate NH_4 20 p. 100 Super 16 p. 100 KCl 60 p. 100 50 t/ha fumier *	50 380	100 200	150 845	175 807	1,0 155	5,0 48	75 90	120,5 200
1964	Fétuque S. 170 (1re année) (2 coupes)	80,7	72,5	Ammonitrate 20 p. 100 Scories 20 p. 100 K_2SO_4 48 p. 100	25	200	306	540	2,5	16,6	112,5	21,0
1965	Fétuque (2e année) (3 coupes)	143,7	132,8	Ammonitrate 20 p. 100 Super 18 p. 100 KCl 60 p. 100	50	75	200	176	1,2	4,7	46	90
1966	Tournesol	28,0	21,1	Ammonitrate 33 p. 100 30 t/ha fumier	75 96	69	276	309	66	33	21,3	98

1967	Lentille	15,4	12,5	$CaCO_3$ 52 p. 100				500				
1968	Colza Sarepta	45,0	35,5	Ammonitrate 33 p. 100 Sulfate NH_4 20 p. 100	150						55	
1969	Betterave sucrière	605,0	351,0	Ammonitrate 33 p. 100	150							
1970	Blé Moisson	54,5	32,8	Ammonitrate 33 p. 100	120							
1971	Tabac	15,2	19,1	Ammonitrate 33 p. 100 Super 25 p. 100 K_2SO_4 50 p. 100	150	100	100	110	1,7	5,7	76	6,5
1972	Tournesol 65-01	35,0	27,9	Ammonitrate 33 p. 100 Scories 17 p. 100 KCl 60 p. 100	60	58	352	179	1,3	9,0		282
1973	Blé Courtot	63,6	48,4	Ammonitrate 33 p. 100 Super 25 p. 100 K_2SO_4 50 p. 100	162	69,5	142	83	2,0	5,9	77	9,7
1974	Tournesol Airelle	21,4	13,4	Ammonitrate 33 p. 100 Scories 18 p. 100 K_2SO_4 50 p. 100	80	150	505	460	1,0	13,5	175	29,5
1975	Betterave sucrière	293,0	178,0	Ammonitrate 33 p. 100 Super 25 p. 100	150	75	200	90	2,2	5,9	31,7	161,5
Moyenne annuelle de la fertilisation appliquée compte tenu de l'apport du fumier.					125	85,4	230	263	16,8	10,8	59,5	81,3

* *Observations.* — La composition du fumier appliqué en 1963 est exceptionnellement riche en K_2O et CaO. Ne pouvant reprendre désormais ces déterminations, nous ne donnons ces résultats qu'avec réserve.

II. — Dynamique du drainage

Caractéristiques générales du drainage

Le tableau 3 précise au cours des 15 années d'expérimentation la succession des diverses cultures, jamais interrompues dans les quatre cases de végétation conduites de façon rigoureusement identiques, ainsi que les fumures appliquées et les productions obtenues. Précisons que tous les résidus de récolte ont été enlevés, qu'aucun pesticide n'a été utilisé et qu'aucune irrigation complémentaire n'a été appliquée, sauf en 1964 et en 1970 où chacune des cases a reçu exceptionnellement 17,5 et 15 mm d'eau. Ainsi les apports d'eau se limitent à ceux de la pluie, à très peu près.

Le drainage peut s'appréhender en considérant les divers paramètres intervenant dans le bilan de l'eau dans le sol. On peut écrire pour un intervalle de temps donné :

$$Dr = P - ETR - \Delta_r . \qquad (1)$$

Dr = Drainage.
P = Pluviométrie.
ETR = Evapotranspiration réelle.
Δ_r = Variation des réserves en eau du sol au cours de la période considérée.

Toutes les données étant exprimées en mm.

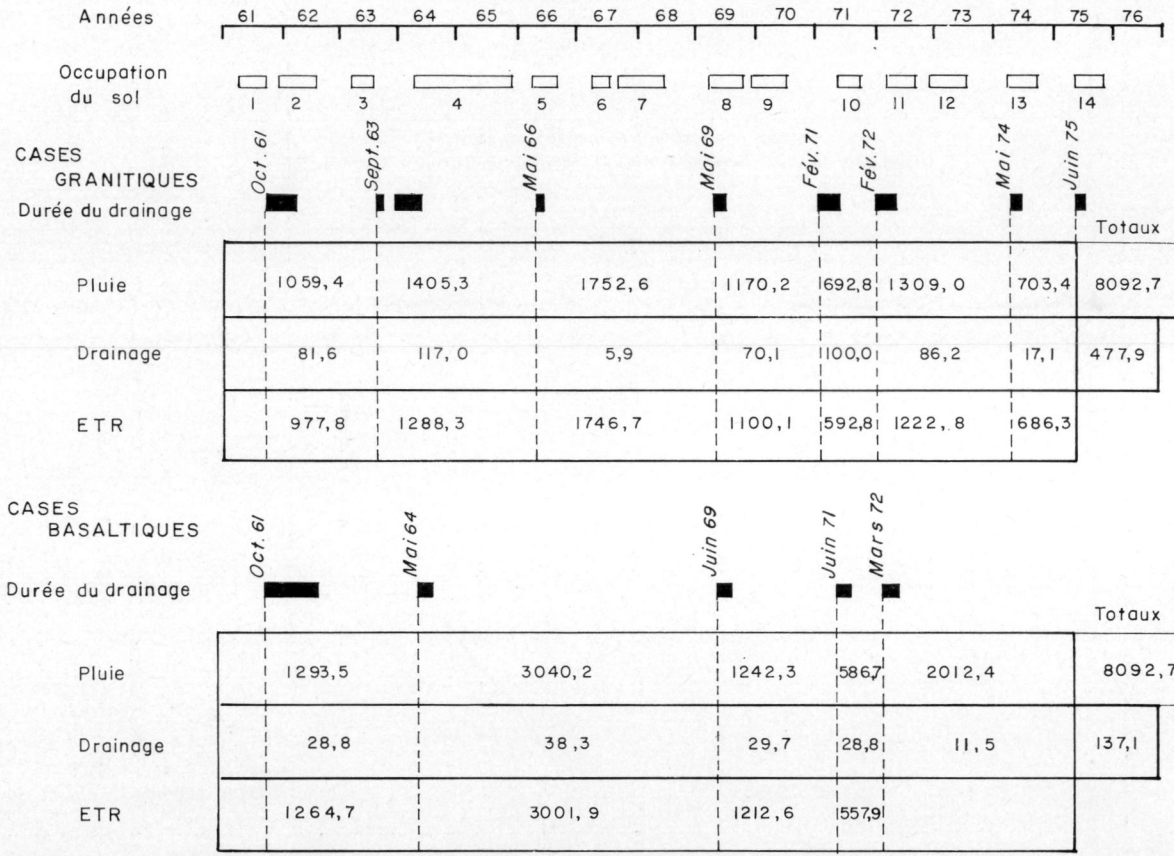
Le drainage se produit chaque fois que les réserves en eau r dépassent la capacité au champ C_r.

Dans le cas présent, on enregistre *un drainage particulièrement faible* (tabl. 4), à la fois dans les cases granitiques et basaltiques : 32,0 mm et 9,1 mm par an respectivement, ce qui ne représente que 5,9 p. 100 et 1,7 p. 100 des précipitations dans les deux situations. Ce phénomène peut s'expliquer comme suit : sous le climat limagnais, la pluviométrie est nettement inférieure à l'évapotranspiration réelle maximale des cultures (ETM) ; de 1962 à 1971, on enregistre une ETM moyenne annuelle de 720 mm alors que la pluviométrie moyenne annuelle ne s'élève qu'à 592 mm durant la même période. Ceci conduit à une ETR généralement inférieure à l'ETM mais elle est d'autant plus élevée que la capacité de stockage du sol est elle-même plus forte. L'accroissement de ce stock augmente l'ETR aux dépens du drainage : c'est le cas pour les deux sols étudiés.

De plus, l'intensité du *drainage est également très irrégulière* dans les deux catégories de sols comme l'indique encore le tableau 4 ; elle est toujours supérieure dans les sols granitiques de profondeur identique, mais de capacité de rétention un peu moins forte. Sur les 15 années d'observation, on relève 5 années pratiquement sans drainage pour les cases granitiques et 9 pour les cases basaltiques. Les écarts sont aussi très sensibles d'une année à l'autre ; le drainage le plus élevé enregistré en 1964 atteint 102,5 mm pour les cases granitiques et 38,3 mm pour les cases basaltiques.

Si l'on étudie la répartition du drainage dans le temps, on observe que celui-ci présente dans l'ensemble un maximum au printemps et au début de l'été (avril-mai-juin). Il coïncide alors avec le maximum pluviométrique de la région, comme en 1964, 1969, 1971 et 1975 (fig. 1) ; mais parfois on constate également un drainage hivernal de plus faible intensité comme en 1961-1962 et 1972.

TABLEAU 4



Drainage et consommation d'eau par les cultures (mm d'eau).
Les différentes périodes sont délimitées par les débuts de drainage.

Cultures : 1. Pomme de terre
2. Blé
3. Ail
4. Fétuque élevée
5. Tournesol
6. Lentille
7. Colza
8. Betterave sucrière
9. Blé
10. Tabac
11. Tournesol
12. Blé
13. Tournesol
14. Betterave sucrière

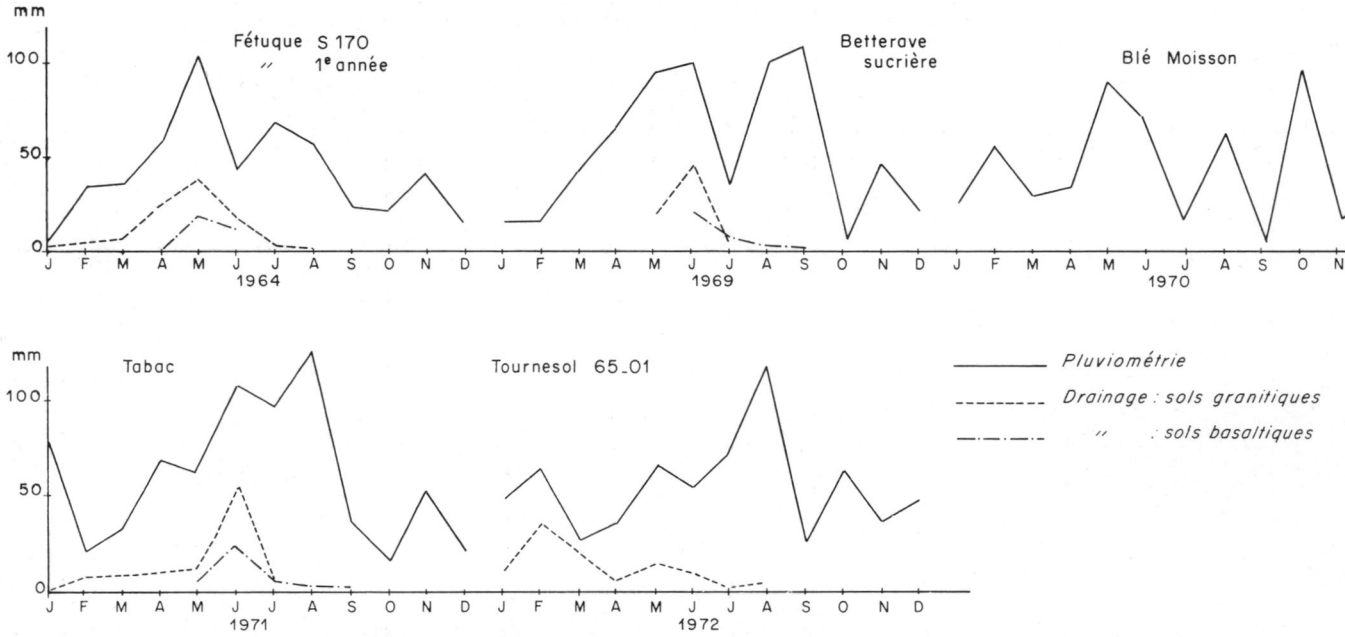


FIG. 1. — *Pluviométrie et drainage* (en mm) *dans les cases de Mon Désir. Exemples en fonction de quelques cultures.*

Essai d'explication de l'intensité du drainage
Choix de quelques exemples

1. — *Années où le drainage est le plus marqué.*

1964. — *Implantation de la Fétuque Elevée.*

Drainage { 102,5 mm — cases granitiques
38,3 mm — cases basaltiques.

La succession culturale de l'ail en 1963 et de la fétuque élevée semée dans la seconde quinzaine d'avril a engendré une faible demande hydrique sur une longue période au cours de laquelle la pluviométrie, notamment de janvier à juin 1964, a été légèrement supérieure à la normale.

1971. — *Culture du tabac.*

Drainage { 93,5 mm — cases granitiques
29,8 mm — cases basaltiques.

Le drainage s'explique à la fois par la forte pluviométrie (100 mm de plus que la normale au cours des 6 premiers mois de l'année) et aussi par l'absence de couverture du sol depuis la récolte de blé jusqu'à la levée de la culture du tabac début mai.

1972. — *Culture du tournesol.*

Drainage { 92,6 mm — cases granitiques
11,5 mm — cases basaltiques.

Ce drainage est lié à la conjonction de deux facteurs : faible consommation d'eau l'année précédente (tabac) et absence d'occupation du sol durant l'hiver 1971-1972.

2. — *Années où le drainage n'apparaît pas dans les deux situations.*

1965. — *Fétuque de 2e année.*

On peut invoquer, malgré la pluviométrie abondante, la forte consommation d'eau par la Fétuque de 2e année, avec une production élevée de 143,7 et 132,9 q/ha de M.S. respectivement dans les cases granitiques et basaltiques.

1968. — *Colza.*

La raison est identique : forte consommation d'eau par cette culture qui occupe le sol depuis septembre jusqu'en juillet et qui a épuisé les réserves, malgré une année humide (680 mm).

1973. — *Blé.*

Faible pluviométrie annuelle (548,3 mm) et consommation d'eau au cours de l'hiver et du printemps par la culture de blé.

En conclusion, il apparaît que le drainage est sous la dépendance de facteurs climatiques et pour comprendre le phénomène, il est nécessaire d'effectuer un bilan hydrique *cumulé* dans le temps, afin de tenir compte de l'état des réserves. Mais l'inter-

vention de la culture est également primordiale. En retardant la mise en place d'un appareil transpiratoire efficace, les cultures de printemps accentuent les risques de drainage comparativement aux cultures implantées à l'automne, d'autant plus que le maximum pluviométrique s'observe au printemps, au départ de la végétation et au début de l'été. Par contre, il n'apparaît généralement pas dans le cas de cultures qui occupent le sol durant une longue période et dont la consommation en eau est maximale au moment où la pluviométrie est la plus élevée.

III. — Composition des eaux de drainage et origine des principaux éléments chimiques

Les différents constituants chimiques des eaux de drainage peuvent être classés en 2 catégories, suivant leur origine (tabl. 5).

A. — *Ceux qui ont une origine mixte, avec intervention possible du sol et de la fertilisation : il s'agit de* SiO_2, Na *et* Mg.

B. — *Ceux qui dérivent quasi-exclusivement des fumures appliquées : il s'agit de* P, Ca, K, N, S, Cl.

A. — *Eléments d'origine mixte ; Sol et Fertilisation*

La silice : SiO^2.

Ce constituant est assez bien représenté dans les eaux de drainage des cases de végétation ; certes les variations des teneurs sont importantes d'une année à l'autre, mais elles restent du même ordre de grandeur dans les deux types de sols.

Il est intéressant de noter aussi la même concentration moyenne 11 mg/l dans les deux milieux, par ailleurs de composition minéralogique très différente, la proportion de $Si\ O^2$ totale s'avérant en particulier beaucoup plus élevée dans les sols granitiques. Toutefois, aucune relation claire ne se dégage concernant les teneurs en fonction de l'intensité du drainage.

Ces valeurs sont voisines de celles indiquées par plusieurs auteurs : Livingstone (1963) pour les eaux des rivières de l'Europe, Tardy (1969) qui donne le même chiffre moyen pour celles recueillies sur granites dans les Vosges alors que, dans le Massif Central, il indique 15 mg/l sur ces mêmes matériaux. Seddoh (1973) donne aussi des résultats comparables pour les eaux des sols granitiques du Morvan. Par contre, les résultats proposés par Chatonier (1957) pour les eaux naturelles des sols granitiques de la Creuse, sont différents ; la moyenne en SiO^2 égale 2 fois celle des cases granitiques de Mon Désir et les teneurs se révèlent intermédiaires entre celles des eaux des zones tempérées et des zones tropicales (30 à 40 mg/l au Sénégal d'après Tardy, 1969). Il en est de même, toujours d'après Chatonier (1957) pour la teneur en SiO^2 des eaux issues de sols volcaniques où la moyenne est alors de 3 fois supérieure à celle des cases basaltiques. De tels résultats sont mentionnés par White *et al.* (1963) pour les eaux ayant percolé à travers des sols granitiques et volcaniques des Etats-Unis. Moinereau *et al.* (1974) citent également pour les eaux de drainage d'un massif de tufs basaltiques des Coirons (Ardèche) des chiffres relativement élevés : 20 à 27 mg/l, exprimant des exportations non négligeables en SiO^2. Les considérations climatiques peuvent

TABLEAU 5

Concentration des eaux de drainage issues des cases de Mon Désir en divers éléments chimiques (en mg/l). *Comparaison avec les eaux naturelles du Massif Central*

A. — *Eléments d'origine mixte : sol et fertilisation*

a) Sols granitiques

	SiO^2			Na			Mg			Na/K Moy.	K+ Na/Ca + Mg Moy.
	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.		
Echantillons issus des cases (total : 6)	17,0	11,6	9,1	35,9	30,0	19,2	30,6	23,1	13,8	1,5	0,4
Eaux issues de sols granitiques de la Creuse											
21 échantillons *	41	22	11	19,2	5,7	2,3	10,9	1,1	0	11,8	3,4
Eaux de lixiviation de granites pulvérisés *											
Guéret		19			7,0			3,0		0,43	1,20
Évaux-les-Bains		15			7,9			2,8		0,75	1,21

b) Sols basaltiques

Echantillons issus des cases (total : 5)	14,0	11,0	8,0	67,5	50,7	22,9	45,0	14,1	3,0	1,23	1,87
Eaux issues de sols volcaniques Chaîne des Puys-Cézallier-Cantal											
22 échantillons *	48	38	21	12,8	9,2	3,5	10,1	5,4	1,6	4,4	0,75
Eaux de lixiviation de roches volcaniques *											
Puy Balmet		25,5			10,6			2,3		2,53	1,39
Louchardière		21			18,7			4,9		2,45	1,05
Volvic		22,5			11,7			5,0		2,40	0,77

TABLEAU 5 (suite)

B. — *Eléments en relation avec la fumure minérale ou organique*

a) Sols granitiques

	P	Ca			K			N			S			Cl		
		Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.
Echantillons issus des cases (total : 6) .	0,02	132	104	82,8	27,4	20,2	12,6	84,5	38,2	19,1	101,8	46,5	4,8	216	78,7	14,2
Eaux issues de sols granitiques de la Creuse																
21 échantillons *		30	5,3	1,1	3,0	0,9	0,3	4,4	1.4	0,2	9,1	1,0	0	6,6	3,6	1,8
Eaux de lixiviation de granites *																
Guéret			11,6			27										
Évaux-les-Bains			8,8			17,5										

b) Sols basaltiques

Echantillons issus des cases (total : 6) .	≠ 0	38,3	25,4	16,4	59,7	34,0	13,3	16,0	9,0	4,6	24	9,3	5,6	76	37,0	10,1
Eaux issues de sols volcaniques Chaîne des Puys-Cézallier-Cantal 22 échantillons *		14,6	9,2	2,8	9,5	5,5	1,2	4,4	1,2	0	2,6	1,0	0	10,4	4,3	1,3
Eaux de lixiviation de roches volcaniques *																
Puy-Balmet			11,4			11,9										
Louchardière			13,7			13,0										
Volvic			9,5			8,0										

* Réf. Denise Chatonier (1957).

expliquer ces différences, bien qu'elles affectent sans doute davantage les quantités globales exportées que les teneurs.

Quant à l'origine de la silice contenue dans les eaux de drainage, le tableau 6 fournit d'utiles indications, avec une esquisse de bilan global pour cet élément. Les apports réalisés surtout par les superphosphates et les scories ont été estimés d'après

TABLEAU 6

Essai de bilan général des principaux constituants chimiques au terme de 15 années d'expérimentation en cases de végétation. Résultats en kg/ha

Eléments	SiO_2	Na_2O	MgO	P_2O_5	CaO	K_2O	N	S	Cl
1) *Cases granitiques* N° 3-15									
Apports totaux par la fertilisation minérale et organique...	166	146	233	1 130	3 600	3 030	1 623	802	978
Exportations par la récolte....	623 *	51	335	532	1 236	2 902	1 903	336	946
Exportations par drainage ...	51	189	191	0	683	113	197	174	287
Bilan global	— 508	— 94	— 293	+ 598	+ 1 681	+ 15	— 477	+ 292	— 255
2) *Cases basaltiques* N° 2-14									
Apports totaux par la fertilisation minérale et organique...	166	146	233	1 130	3 600	3 030	1 623	802	978
Exportations par la récolte....	402 *	54	317	315	914	2 558	1 771	326	916
Exportations par drainage ...	16	90	13	0	51	42	14	13	42
Bilan global	— 252	+ 2	— 97	+ 815	+ 2 636	+ 430	+ 36	+ 463	+ 20

* Estimation partielle, calculée à partir des pailles de Blé et du foin de Fétuque.

les analyses moyennes de ces engrais fournies par Gervy (1970). Quant aux exportations par les récoltes, nous n'avons comptabilisé que les plus importantes, soit celles des pailles de Blé et du foin de Fétuque en retenant les valeurs moyennes données par Coppenet *et al.* (1947) et Demolon (1968). Malgré ces renseignements fragmentaires et incomplets, il ressort que le bilan de SiO^2 est très largement négatif et que par conséquent, si l'intervention de la fumure est possible dans la fourniture de SiO^2 aux eaux de drainage suivant l'opinion de Demolon (1952), celle du sol est également certaine.

Le sodium.

La concentration des eaux de drainage en sodium s'avère très élevée aussi bien dans les cases granitiques que basaltiques et, de plus, elle est toujours supérieure en cet élément dans ces derniers sols (fig. 2). L'explication de ce phénomène s'avère très délicate. Il faut aussi souligner que ces données sont voisines de celles enregistrées dans les cases de Mon Désir pour les terres noires argilo-calcaires de Limagne (Collier et Robelin, 1959).

Dans les deux situations, les teneurs en Na sont au minimum 5 fois supérieures à celles données par Chatonier (1957) pour les eaux naturelles de diverses régions du

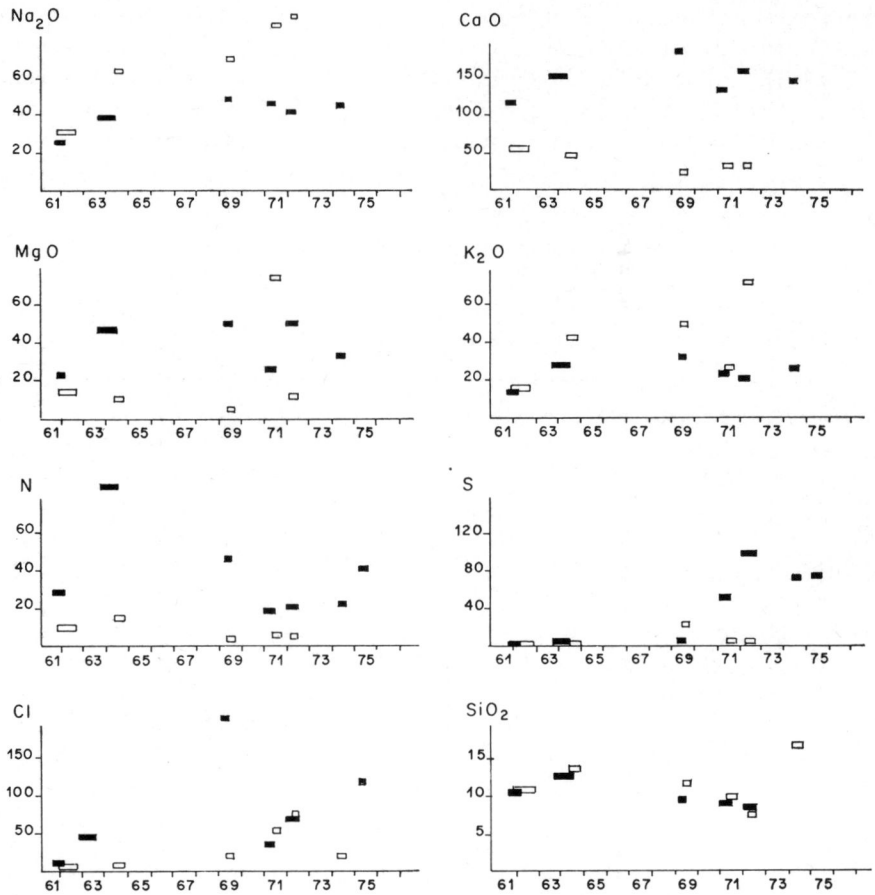


FIG. 2. — *Variations de la composition moyenne des eaux de drainage au cours du temps* (mg/l).

Cases granitiques.

Cases basaltiques.

Massif Central, ainsi que par White *et al.* (1963) pour des échantillons des Etats-Unis. Toutefois il faut noter que pour le massif volcanique des Coirons étudié par Moinereau *et al.* (1974), ces auteurs ont aussi constaté de très fortes variations dans les compositions des eaux en Na (2 à 53 mg/l), les concentrations les plus élevées apparaissant lors de violents orages.

En ce qui concerne l'origine de Na, il est intéressant de consulter le tableau 6. Remarquons cependant qu'il n'a pas été tenu compte de la composition des eaux de pluie analysées depuis la campagne 1971-1972 et qui apportent en moyenne 13 kg/ha Na^2O.

Il ressort de l'examen de ce tableau que si la fumure peut rendre compte à elle seule des pertes par drainage enregistrées pour les sols basaltiques — ce qui n'exclut pas pour autant une certaine participation du sol à la fourniture en Na — il faut invoquer un apport partiel du sol en cet élément dans le cas des sols granitiques où le bilan est largement négatif, aux dépens des feldspaths plagioclases très vulnérables.

Le magnésium.

Les concentrations des eaux de drainage sont également très élevées en Mg. Si on les compare à celles des sols argilo-calcaires on constate qu'en moyenne les teneurs sont voisines pour les cases granitiques, mais plus faibles pour les cases basaltiques. Mais dans les deux situations, elles dépassent très largement celles des eaux naturelles du Massif Central. Par ailleurs, on enregistre des variations très accusées surtout dans les cases basaltiques.

On peut montrer qu'elles sont en liaison étroite avec la fertilisation. L'application d'une fumure abondante en MgO du fumier : 155 kg/ha en 1963 a déterminé un accroissement substantiel des concentrations et des exportations en cet élément dès la première année d'application et la suivante en 1964. Par contre, l'apport de 66 kg/ha MgO en 1966 toujours par le fumier a été consommé intégralement par les récoltes qui n'ont pas reçu d'apport magnésien jusqu'en 1970.

Au-delà de cette date, les concentrations des eaux se sont avérées très variables, avec en particulier un maximum en 1971 où l'apport a été cependant très faible par les fumures.

De toute façon, tout comme pour SiO^2 et Na^2O, il faut se référer au tableau 6 pour discuter de l'origine du Mg dans les eaux de percolation. Dans l'ensemble des cases, le bilan global est très largement négatif, surtout dans les sols granitiques ; c'est dire que l'intervention du sol est certaine pour fournir une part des exportations en magnésium, grâce à l'évolution géochimique des minéraux ferro-magnésiens relativement vulnérables : biotite, augite et leurs produits d'altération. Cette intervention est particulièrement nette en 1962 dans les sols granitiques avant l'application du fumier ; les seuls apports en Mg étant imputables à la fumure minérale se chiffrant à 1,4 kg/ha MgO alors que les exportations par les eaux de drainage s'élèvent à 23,7 kg/ha.

B. — *Eléments chimiques dérivant de la fertilisation*

Phosphore.

Les concentrations des eaux de drainage en phosphore sont extrêmement faibles dans les deux types de sols. Ces résultats classiques s'expliquent par les très fortes énergies de fixation qu'exercent les sols sur les phosphates, notamment les sols basaltiques.

Le bilan, largement positif montre que la fertilisation couvre les besoins des récoltes tandis que les pertes par drainage sont pratiquement nulles.

Calcium et potassium.

Les teneurs en CaO sont considérables dans les eaux issues des sols granitiques, à telle enseigne que la moyenne enregistrée sur les quinze ans d'expérimentation est pratiquement la même que celle du dispositif de Chalons-sur-Marne avec un sol de rendzine brune sur craie remaniée (Ballif, 1975). Dans les Terres Noires, les chiffres sont plus élevés et atteignent en moyenne 200 mg/l CaO. Elle est 4 fois plus faible dans les eaux provenant des sols basaltiques, ce qui traduit un pouvoir de rétention marqué vis-à-vis de ce cation. Mais dans les deux types de sols, les teneurs présentent une grande variabilité.

En ce qui concerne K^2O, on constate au contraire une plus forte concentration des eaux dans les cases basaltiques, toujours très largement supérieure à celle des eaux naturelles et en relation peut-être avec un bilan nettement positif. De même, les variations sont aussi beaucoup plus accusées dans ces mêmes cases basaltiques.

Ces teneurs sont en liaison avec les fumures minérales et organiques incorporées, mais l'étude des corrélations entre les concentrations des eaux en Ca et K et les apports par la fertilisation est très décevante. Ceci montre la complexité du phénomène qui se traduit en particulier par un décalage dans le temps entre le moment de l'application de la fumure Ca et K et l'apparition de ces éléments dans les eaux de drainage.

Azote, soufre et chlore.

Les concentrations sont également considérables dans les deux types de sols, sans aucune mesure avec celles des eaux naturelles. Ces trois constituants sont toujours plus abondants dans les eaux des sols granitiques, ce qui démontre la rétention supérieure des sols volcaniques à l'égard de ces trois éléments mobiles.

On ne décèle pas non plus de corrélation entre les apports par les fumures et la concentration des eaux en N, S et Cl.

IV. — Importance des exportations des différents éléments au cours du drainage

Le tableau 7 indique les exportations moyennes annuelles des principaux éléments chimiques au cours du drainage, calculées sur une période de 15 ans à partir des concentrations des eaux. Elles sont beaucoup plus fortes dans les cases granitiques, celles des cases basaltiques se révélant d'ailleurs particulièrement réduites même si on les estime avec un drainage identique à celui des sols granitiques à l'exception de Na et K. Les pertes en éléments essentiels majeurs NPK sont très faibles en sols volcaniques, ce qui constitue une donnée intéressante pour la fertilisation ; elles sont négligeables comparativement aux apports par les fumures et aussi aux exportations par les cultures. En sols granitiques, elles s'élèvent à 15 kg/ha/an pour N et 8,1 kg/ha/an pour K^2O, ce qui correspond approximativement aux résultats de Demolon (1952) pour les cases lysimétriques de Versailles occupées par une terre de limon neutre et cultivées durant la période 1932-1950. Les données récentes publiées par Ballif *et al.* (1975) pour les cases de la Station Agronomique de Chalons-sur-Marne font état de pertes plus élevées pour ces deux éléments.

Dans les cases granitiques de Mon Désir, les pertes annuelles les plus importantes sont enregistrées pour Ca. Viennent ensuite Cl, puis N, S, Mg et Na, peu différents entre eux. Si on estime les pertes en fonction des apports par les fumures minérales et organiques, on constate que dans le cas du sodium, elles sont plus importantes, ce qui confirme la fourniture partielle de cet élément par le sol.

Dans les cases basaltiques, c'est également Na qui est évacué de façon préférentielle, 60 p. 100 des apports étant entraînés par drainage.

Quant à SiO^2, il faut indiquer que les pertes sont du même ordre à Mon Désir que celles de l'expérience de Versailles suivie par Pédro (1961) avec un matériau granitique.

TABLEAU 7

Importance des exportations annuelles des divers constituants chimiques au cours du drainage à Mon Désir. Moyenne de 15 ans d'expérimentation (en kg/ha)

Eléments	Cases granitiques		Cases basaltiques			Case lysimétrique de Versailles remplie par un matériau granitique (moyenne de 30 ans) d'après G. Pédro (1961)
	Exportations annuelles	Exportations en p. 100 des apports annuels par les fumures	Exportations annuelles à drainage normal	Exportations en p. 100 des apports annuels par les fumures	Exportations avec drainage identique à celui des cases granitiques	
SiO^2	3,6	—	1,12	—	4,06	2,7
Na^2O	13,5	125,0	6,4	59,2	23,2	1,8
MgO	13,6	81,0	0,96	5,7	3,5	1,1
P^2O^5	0,04	0,05	0,007	0,08	0,02	
CaO	48,1	17,1	3,6	1,3	13,0	7,7
K^2O	8,1	3,5	3,0	1,3	10,9	3,6
N	15,1	12,0	0,96	0,77	3,5	
S	13,8	22,9	0,92	1,5	3,3	
Cl	23,1	28,4	3,0	3,7	10,9	

V. — Classification des constituants chimiques des sols par ordre de mobilité croissante

Il est classique en géochimie, lors de l'étude de l'évolution superficielle des roches, de proposer une séquence d'altération où les principaux constituants chimiques sont classés par ordre de mobilité croissante, ce qui établit, du même coup, une échelle de résistance des matériaux. En exploitant les résultats trouvés pour les exportations des éléments chimiques par les eaux de drainage, dans les cases de végétation, la même séquence peut être construite.

Nous considérerons deux cas : d'abord la position respective de Si, Na, Mg et Ca, ce qui permettra une comparaison avec celle des mêmes composants au cours de l'altération des roches cristallines dans les zones tempérées, ensuite le classement de P, K, N, S et Cl c'est-à-dire des éléments dérivant de la fertilisation.

a. — *Cas de* Si, Na, Mg *et* Ca

La position respective des 4 constituants des eaux de drainage rangés par ordre de mobilité croissance d'après le bilan pondéral des exportations est la suivante :

Cases granitiques : Si $<$ Na, Mg $<$ Ca.
Cases basaltiques : Mg, Si $<$ Ca $<$ Na.

On retrouve pour les sols granitiques de Mon Désir, placés dans des conditions fort éloignées de celle du milieu naturel puisqu'ils reçoivent régulièrement une fertilisation, la séquence de Smith établie dès 1913 lors de l'évolution géochimique superficielle des roches cristallines : Si $<$ Mg $<$ Na $<$ Ca ; elle exprime que les micas contenant Mg sont moins altérables en général que les feldspaths plagioclases (Na et Ca).

Cette même séquence a été depuis introduite par un grand nombre d'auteurs, entre autres : Polynov (1937), Goldich (1938), Tiller (1958), Anderson et Hawkes (1958), Collier (1951 et 1967), Tardy (1969), Seddoh (1973).

Ici Mg est aussi mobile que Na, mais nous avons vu l'intervention de la fertilisation qui se surimpose aux éléments apportés par le sol. Il n'en demeure pas moins que la comparaison des compositions des eaux de drainage et de celles des produits d'altération dérivés des roches cristallines s'avère fort fructueuse et justifie pleinement des travaux tels que ceux de Pédro (1966) et Tardy (1969).

Dans les sols basaltiques,la séquence traduisant la mobilité relative est différente, Mg se situant à côté de Si, tandis que Ca précède Na, ce qui est classique en milieu basique.

Pour Hétier (1975), la mobilité relative des constituants chimiques est la suivante au cours des processus de l'andosolisation étudiés dans le Massif Central :

Si $<$ Ca — Mg $<$ K — Na .

Nous retrouvons à Mon Désir la même séquence, malgré l'intervention de la fertilisation, mise à part la position de Mg proche de celle de Si. Ainsi, il existe un assez bon accord, malgré des conditions fort différentes, entre les données géochimiques obtenues expérimentalement à Mon Désir et celles recueillies au cours de l'altération dans le milieu naturel dans les zones granitiques et basaltiques.

b. — *Autres éléments*

La mobilité relative des autres éléments en liaison avec la fertilisation, s'établit comme suit :

Cases granitiques : $P < K < S < N < Cl$.
Cases basaltiques : $P < N, S < K, Cl$.

VI. — Sens de l'évolution chimique dans les sols granitiques et basaltiques des cases d'après les analyses des eaux de drainage et celles des substrats

1. — *Paramètres de Pédro* (1966)

A partir des résultats analytiques nous avons tenté de calculer les paramètres définis par Pédro (1966) :

$$L = \frac{SiO^2}{Ca + Mg + Na + K}$$ dans les eaux de drainage

$$R = \frac{SiO^2 \text{ combinée}}{Ca + Mg + Na + K}$$ dans le substrat granitique ou basaltique

$$R_K = \frac{SiO^2 \text{ combinée} - 2\,Al^2O^3}{Ca + Mg + Na + K}$$ dans le substrat granitique ou basaltique.

Chacun des éléments chimiques est exprimé en molécules.

Ne disposant pas d'analyses pour le granite à 2 micas et le basalte à l'origine des sols contenus dans les cases de végétation, nous avons retenu les valeurs moyennes données pour 23 granites à 2 micas et 17 basaltes du Massif Central par Lapadu-Hargues (1964) et Michel (1953).

On obtient à Mon Désir les relations suivantes entre les 3 paramètres, *aussi bien dans les cases granitiques que basaltiques* : $L < R_K$ et $L < 0{,}64\ R$, qui selon Pédro (1966), définit les conditions de la bisiallitisation observée classiquement en régions tempérées où les minéraux argileux 2/1 peuvent s'élaborer par suite de la faible exportation de la silice.

Or si l'on consulte le tableau 8 donnant les résultats des analyses des phases fines 0-2 μ et 2-20 μ des sols des cases de végétation, on constate que dans les granites, les minéraux secondaires essentiels sont représentés par un interstratifié illite-vermiculite et la kaolinite avec un rapport moléculaire global $SiO^2/Al^2O^3 = 2{,}75$ caractérisant la bisiallitisation franche.

Les sols basaltiques contiennent aussi des minéraux 2/1 (montmorillonite, vermiculite et illite) et 1/1 (kaolinite), mais surtout une part considérable d'allophanes, à telle enseigne que la courbe thermogravimétrique de la fraction $< 2\ \mu$ (fig. 3) est très proche de celles des allophanes étudiés au Japon par Kitagawa (1974), tout comme l'analyse chimique totale pour les teneurs en SiO^2 et Al^2O^3. Cette phase amorphe est mieux représentée que dans les sols volcaniques du Massif Central observés par Hétier (1975) où elle ne dépasse pas 20 p. 100 ; elle peut être comparée à celle de certains andosols de l'Est des Carpathes (Stoica *et al.* (1974)). Le rapport SiO^2/Al^2O^3 de la phase non cristal-

TABLEAU 8

Analyses des phases fines des sols des cases de végétation

Eléments	Sol granitique		Sol basaltique	
	An. n° 8129	An. n° 8130	An. n° 8131	An. n° 8132
	Argile < 2 μ	Phase 2-20 μ	Argile < 2 μ	Phase 2-20 μ
SiO^2	41,90	56,90	28,20	37,50
Al^2O^3	25,65	20,20	24,80	20,00
Fe^2O^3	9,28	4,78	9,83	11,38
FeO	1,01	0,56	4,30	1,73
TiO^2	1,15	1,60	2,85	2,80
P^2O^5	—	0,30	—	0,30
MnO	0,18	0,08	0,18	0,19
CaO	traces	0,20	0,50	2,25
MgO	2,00	1,20	0,80	1,70
K^2O	3,75	4,35	0,50	1,00
Na^2O	0,40	1,90	0,25	1,10
H^2O^+	12,30	5,22	24,00	16,80
H^2O^-	2,60	1,26	4,70	3,70
Total	100,22	98,55	101,01	100,45
p. 100 Fe^2O^3 libre	5,65	2,77	8,00	10,20
SiO^2/Al^2O^3	2,75	4,78	1,94	3,18
Surface totale m^2/g (Guyot)	144,5	47,7	480	274
Composition minéralogique				
Phase non cristalline	4,0	traces	40,0	30,0
Montmorillonite			15,0	—
Vermiculite	13,0	7,0	15,0	15,0
Illite-Micas	15,0	30,0	5,0	10,0
Kaolinite	43,0	12,0	10,0	10,0
Oxydes de fer libres	6,0	3,0	9,0	10,0
Oxyde de titane	—	—	2,5	2,5
Minéraux primaires — Feldspaths	18,0	28,0	4,0	20,0
Minéraux primaires — Quartz	—	17,0	—	—

Analyses : F. Cantagrel et S. Couturié, labo de Géologie, Clermont 1976.
Remarque : La composition minéralogique, très difficile à établir, surtout dans le cas du sol basaltique, n'est qu'une estimation approchée.

line étant ici proche de 1 (environ 1,4 pour les échantillons de Kitagawa (1974)), il en résulte que cette valeur n'atteint que 1,94 pour la fraction totale < 2 μ extraite des sols basaltiques des cases, ce qui indiquerait dès lors la zone de monosiallitisation. En fait, si l'on ne tient pas compte de la phase non cristalline pour n'étudier que les phyllites cristallisées, selon les indications de Pédro (1966), on obtient un rapport SiO^2/Al^2O^3 égal à 3,2 et l'on se retrouve dans la zone de la bisiallitisation. Ainsi la composition chimique des eaux de percolation semble bien en équilibre avec la genèse des minéraux 2/1.

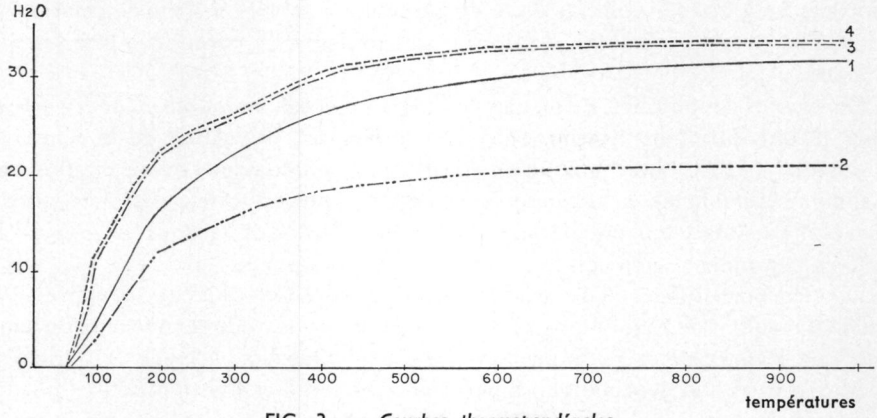


FIG. 3. — *Courbes thermopondérales.*

1. — Argile < 2 μ sol basaltique des cases.
2. — Phase 2-20 μ.
3. — Allophane pure de Mitsosuchi (Japon).
4. — Allophane pure de Kanumatsuchi (Japon).

2. — *Paramètres de Tardy* (1969)

Cet auteur a montré que le rapport SiO^2/Al^2O^3 des produits secondaires argileux néoformés au cours des altérations pouvait se calculer à partir de la seule connaissance de la composition des eaux de nappe ou de source. Les paramètres sont les suivants :

Cas des granites :

$$R_E = SiO^2/Al^2O^3 = \frac{6\,K^2O + 6\,Na^2O + 2\,CaO - SiO^2}{K^2O + Na^2O + CaO}.$$

Cas des basaltes :

$$R_F = SiO^2/Al^2O^3 = \frac{6\,K^2O + 6\,Na^2O + 1{,}53\,CaO + MgO - SiO^2}{K^2O + Na^2O + 0{,}52\,CaO}.$$

Les éléments contenus dans les eaux sont exprimés en molécules. La figure 4 où

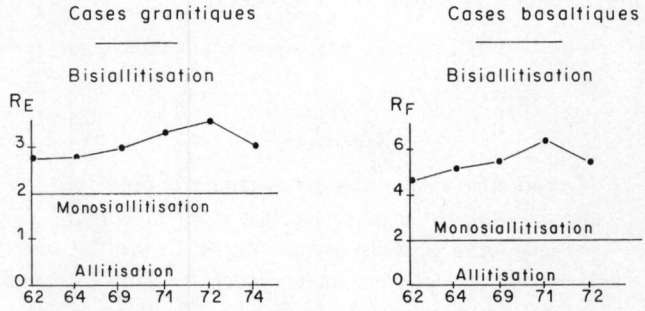


FIG. 4. — *Paramètres de Tardy. Cases granitiques et basaltiques.*

sont consignés les résultats acquis à Mon Désir indique le domaine de la bisiallitisation dans le cas des sols granitiques et il est remarquable de noter que le rapport R_E

compris entre 2,8 et 3,2 pour les eaux de percolation est très proche de celui calculé pour la phase $< 2\,\mu$: 2,75. Il y a donc une excellente concordance entre les deux estimations.

Dans le cas des basaltes, R_F est compris entre 4,7 et 6,3, indiquant à l'heure actuelle encore la bisiallitisation franche, alors que le rapport SiO^2/Al^2O^3 de la phase fine $< 2\,\mu$ déduit de l'analyse chimique est voisin de 2, comme nous l'avons dit plus haut, par suite de la haute teneur en allophanes. La différence est ici très marquée entre les deux résultats. Mais il faut mentionner que la valeur élevée de R_F dans les eaux est due à la forte concentration en cations, du fait des apports par les fumures.

D'autre part, le calcul du rapport moléculaire SiO^2/Al^2O^3 de la phase $< 2\,\mu$ traduit les résultats de l'évolution géochimique des matériaux du sol au cours du temps, tandis que le paramètre R_F exprime le sens de l'altération actuelle.

Ainsi, l'évolution géochimique superficielle conduit à une bisiallitisation ménagée dans le cas des sols granitiques, quelle que soit la technique utilisée. Dans le cas des basaltes, il y a discordance entre les calculs des paramètres de Pédro et Tardy qui indiquent la bisiallitisation et celui du rapport SiO^2/Al^2O^3 des minéraux argileux néoformés qui oriente vers la monosiallitisation également ménagée. Du fait de la haute teneur en allophanes, il semble que l'on se situe ici dans un domaine intermédiaire.

Conclusions

Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette étude peuvent être condensées comme suit : dans les conditions climatiques subcontinentales de la Limagne de Clermont-Ferrand, le drainage des cases granitiques et basaltiques apparaît d'une part très faible et d'autre part très irrégulier en relation avec la pluviométrie de l'année et la culture pratiquée (coefficient moyen de drainage = 5,9 p. 100 et 1,7 p. 100 respectivement). Il s'ensuit que les exportations par les eaux de drainage des éléments minéraux et notamment NPK, sont relativement peu importantes dans le cas des sols granitiques et pratiquement négligeables pour les sols basaltiques.

Au point de vue géochimie, la composition des eaux de drainage est en équilibre avec la genèse des minéraux argileux 2/1 d'une manière caractéristique dans les sols granitiques, et plus atténuée dans les types basaltiques.

Reçu pour publication en juillet 1977.

Summary

Comparative study about the dynamics of drainage and the composition of percolation water in granitic and basaltic soils in the Massif Central
Results of observations in vegetation boxes under the climatic conditions of the Limagne basin during 15 *years*

The dynamics of drainage, the composition of percolating water and the transport of the principal chemical elements have been studied in vegetation boxes with a granitic and a basaltic soil under climatic conditions of the Limagne basin of Clermont-Ferrand, where the annual pluviometry is about 570 mm.

Experimenting has been going on for a period of 15 years.

The main results obtained can be summed up as follows :

In both soil categories the drainage is irregular and depends on the annual pluviometry, but also on the more or less important water consumption of the cultivation.

Moreover drainage proves to be very low, particularly in the case of basaltic soils.

The different constituents of the drainage waters can be classified into two categories according to their origin :

a) those deriving from both soil and fertilization : Si, Na, Mg ;
b) those deriving almost exclusively from fertilization.

Fertilising actually increases the richness of water concentrations on the whole as compared with the natural waters of the Massif Central.

The transport of mineral elements by the drainage waters is relatively unimportant, especially in basaltic areas.

Last of all, there is an equilibrium of the composition of the drainage waters and the genesis of argillaceous minerals 2/1 in granitic soils. The proportion of allophanes appears, however, to be very high in basaltic soils. Therefore the same equilibrium is less apparent in this kind of soil.

Zusammenfassung

Vergleichende Untersuchung über die Dynamik der Entwässerung und die Zusammensetzung der Sickerwasser in den Granit- und Basaltböden des Zentralmassivs
Ergebnisse fünfzehnjähriger Beobachtungen von Vegetationsbehältern mit deuklimatischen Verhältnissen des Limagnebeckens

In Vegetationsbehältern mit einem Granitboden und einem Basaltboden wurden die Dynamik der Entwässerung, die Zusammensetzung der Sickerwasser und das Ausscheiden der wichtigsten chemischen Elemente unt`rsucht bei klimatischen Verhältnissen, die denen des Limagnebeckens von Clermont-Ferrand angepasst waren, wo der Niederschlag jährlich normalerweise 570 mm beträgt.

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

In beiden Bodenkategorien ist die Entwässerung unregelmässig. Sie hängt einerseits vom Jahresniederschlag ab und andererseits vom mehr oder weniger hohen Wasserverbrauch der Kultur.

Es hat sich ausserdem gezeigt, dass die Entwässerung besonders im Falle von Basaltböden sehr schwach ist.

Die verschiedenen Bestandteile der Dränagewasser können nach ihrer Herkunft in zwei Kategorien eingeteilt werden :

a) in solche, die sowohl aus dem Boden als auch aus der Düngung stammen : Si, Na, Mg ;
b) und solche, die fast ausschliesslich von der Düngung herrühren : P, Ca, K, N, S, Ci.

Die Düngung bewirkt auch eine insgesamt reichhaltigere Wasserkonzentration als beim natürlichen Wasser des Zentralmassivs.

Das Ausscheiden von mineralischen Elementen im Dränagewasser erfolgt vor allem in Basaltgebieten in relativ geringem Masse.

Die Zusammensetzung der Dränagewasser erfährt mit der Genesis tonhaltiger Mineralien 2/1 eine Ausgeglichenheit in Granitböden. Da sich die Allophanproportion in Basaltböden als sehr hoch erweist tst dieselbe Gleichgewicht bei dieser Art von Boden weniger deutlich.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение динамики дренажа и состава просачиваюшихся вол в гранитических и базальтовых почвах центрального массива.

Результаты 15 ти летних наблюдений над вегетационными делянками в климатических условиях бассейна лиманъ.

ДЕЖУ Ж., МОРИЗЕ Ж.

На гранитической и базальтовой почвах вегетационных делянок, в климатических условиях бассейна Лиманъ в районе Клермон-Феррана, где нормальное количество годовых

осацков составляет 570 мм, изучались динамика дренажа, состав просачивающихся вод, и вынос ими главных химических элементов. Опыты продолжались в течении 15-ти лет. Главные результаты этих экспериментов можно обобщить следующим образом :

Дренаж действует нерегулярно в обеих категориях почв и дежствие это зависит от годовых осадков, с одной стороны, и от количеств влаги потребляемой разными культурами сдругой ; оно особенно слабо в случаях базальтовых почв.

Все составные вод дренаха можно разделить на две большие категории, в зависимости от их происхождения :

а) элементы вымывающиеся водой как из почвы, так и из удобрения : Si, Na, Mg,
б) элементы приносимые почти исключительно удобрением : P, K, Ca, N, S, Cl.

Можно сказать, что воды дренажа, вобщем, более богаты солями чем природные воды Центрального Массива, благодаря удобрениям.

Количества минеральных элементов выноящиеся этими водами относительно не велики, особенно в случае базальтовых почв.

И, наконец, состав вод дренажа в гранитических почвах находится в равновесном состоянии (2/1) с образованием глинистых минералов ; а, в виду того, что пропорция аллофанов в базальтовых почвах более велика, равновесие это проявляется в них менее четко.

Références bibliographiques

ANDERSON D. H., HAWKES H. E., 1958. Relative mobility of the commun elements in weathering of some schist and granite aeras. *Geochim. Cosmoch. Acta*, **14,** 204-210.

BALLIF J. L., DURAND L., DUTIL P. et MULLER J., 1975. *Résultats des études en cases lysimétriques. Campagnes* 1973-74 *et* 1974-75. INRA, Trav. Sc. du Sol, Station de Châlons-sur-Marne, Publ. n° 37, 68 p.

BONFILS P., MOINEREAU J., 1971. Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au sud du Massif Central. *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*, IX, 3, 345-363.

CHATONIER Denise, 1957. *Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux en rapport avec la composition chimique du sous-sol.* 1 volume, Impr. de Bussac, Clermont-Ferrand, 172 p.

COLLIER D., 1951. Contribution à l'étude de l'altération des granites et de l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne. *Bull. A.F.E.S.*, 23, 1-12.

COLLIER D., 1961. Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. *Ann. agron.*, **12** (3), 273-331.

COLLIER D., GACHON L., 1954. De l'influence de différentes conditions de sous-sol sur la végétation et le rendement d'un blé d'hiver en terres noires de Limagne. *C. R. Acad. Agric.*, **40,** 134-138.

COLLIER D., GACHON L., 1955. Influence de différentes conditions de sous-sol de terres noires de Limagne sur l'alimentation minérale, la composition et le rendement d'une orge d'hiver en 1954, *C. R. Acad. Agri.*, **41,** 263-270.

COLLIER D., GACHON L., ROBELIN M., 1956. Influence de différentes conditions de sous-sol de terres noires de Limagne sur l'alimentation minérale, le rendement et la composition de la betterave sucrière en 1955. Essais d'arrosage. *C. R. Acad. Agri.*, **42,** 512-519.

COLLIER D., GACHON L., ROBELIN M., 1957. Cinquième année d'expérience en cases de végétation de la Station d'Agronomie du Massif Central. Essais sur orge de printemps. *C. R. Acad. Agri.*, **43,** 664-670.

COLLIER D., GACHON L., ROBELIN M., 1958. Réaction des plantes cultivées aux conditions de sous-sol ; essais sur maïs-grain. *C. R. Acad. Agri.*, **44,** 610-616.

COLLIER D., ROBELIN M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques. *Ann. agron.*, **10** (4), 415-453.

COLLIER D., GACHON L., ROBELIN M., 1968. Comportement comparé de quelques espèces cultivées dans un même sol suivant la profondeur du plan d'eau. *C. R. Acad. Agri.*, **54,** 168-171.

COLLIER D., 1968. Arrière action à long terme de l'azote des engrais minéraux et organiques en sol argilo-calcaire de Limagne. *C. R. Acad. Agri.*, **54,** 172-175.

COPPENET M., DUCET G., GUÉRILLOT J., KAHANE E., 1947. Sur la silice de la paille et du grain de blé. *Ann. agron.*, 4, 565-567.

DEMOLON A., 1952. *Principes d'agronomie*, t. I. *Dynamique du sol*. 1 vol., Dunod, Paris, 5e édition, 520 p.

DEMOLON A., 1968. *La croissance des végétaux cultivés*, t. II, 6e édition, Dunod, Paris, 590 p.

GACHON L., COLLIER D., ROBELIN M., 1961. Influence de différentes conditions pédoclimatiques sur le comportement de l'association luzerne dactyle en Limagne argilo-calcaire. *C. R. Acad. Agri.*, **47,** 298-306.

GERVY R., 1970. *Les phosphates et l'Agriculture*. 1 vol., Dunod, Paris, 298 p.
GOLDICH S. S., 1938. A study of rock weathering. *Journ. Géol.*, 46, 17-58.
HÉTIER J. M., 1975. *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse Doct. Univ. Nancy 194 p. + XXXIII p. h. texte et bibliogr.
KITAGAWA Y., 1974. Dehydration of allophane and its structural formula. *Americ. Mineralogy*, **59** 1094-1098.
LAPADU-HARGUES P., 1964. *Les phyllosilicates dans les granites et leur signification*. Trav. Labo. Géol. Min. Fac. Sc. Clermont-Ferrand, Série documentation, n° 7, 17 p. + 5 p. de tableaux.
LIVINGSTONE D. A., 1963. *Data of geochemistry*, chap. G : Chemical composition of rivers and lakes. U. S. Geol. Survey, Prof. Paper, 440 G.
LOUGHNAN F. C., 1969. *Chemical weathering of the silicate minerals*. Elsevier, 154 p.
MICHEL R., 1953. *Contribution à l'étude pétrographique des pépérites et du volcanisme tertiaire de la Grande Limagne*. Mém. Soc. Hist. Nat. d'Auvergne, n° 5, 140 p.
MOINEREAU J., BIBENT B., TRICHET J., 1974. Présence de produits amorphes et de minéraux argileux de la famille de l'halloysite en suspension dans les eaux de drainage d'un tuf basaltique. *C. R. Acad. Sci.*, **278,** série D, 2389-2392.
PÉDRO G., 1961. Sur l'altération spontanée du granite en milieu naturel : résultats obtenus au bout de 30 ans dans l'expérience lysimétrique de Versailles. *C. R. Acad. Sci.*, **253** (2), 2242-2244.
PÉDRO G., 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C. R. Acad. Sci.*, **262,** série D, 1828-1831.
POLYNOV B. B., 1937. *Cycle of weathering*. Murby Publ. Londres, 220 p.
SEDDOH F. K., 1973. *Altération des roches cristallines du Morvan* (granites, granophyres, rhyolites). *Etude minéralogique, géochimique et micromorphologique*. Thèse Mém. Univ. Dijon, n° 1, 377 p.
SMITH C. H., 1913. The relative solubilities of the chemical constituents of rocks. *Journ. Geol.*, 21, 105-120.
STOICA E., ATANASESCU R., POPESCU F., EDELSTEIN D., 1974. The clay fraction of a soil sequence formed on volcanic materials in the east Carpathians. *Trans. of the 10th Intern. Congress of Soil Sci.*, VIII, 75-82.
TARDY Y., 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Thèse Fac. Sc. Strasbourg, Mém. Serv. carte géol. Alsace-Lorraine, n° 31, 199 p.
TILLER K. G., 1958. The geochemistry of basaltic materials and associated soils of southeastern South Australia. *J. Soil Sci.*, 9, 225-241.
WHITE D. E., HEM J. D., WARING G. A., 1963. *Data of geochemistry*. 6e édition, Chap. F, Chemical composition of sub-surface waters. U. S. Geol. Survey, Prop. Paper, n° 440 F, 67 p.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 361-378.

Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol Etude au moyen de l'azote quinze

G. GUIRAUD et J. C. FARDEAU

avec la collaboration technique de Gisèle LLIMOUS

Commissariat à l'Energie Atomique, C.E.N. Cadarache, Département de Biologie, Service de Radioagronomie, BP n° 1, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

Résumé

Un sol a été mis à incuber pendant 18 mois avec du nitrate de calcium marqué à l'azote quinze, avec ou sans apport de paille, ou avec du ray-grass marqué. L'incorporation du traceur dans la matière organique avant et après une culture de ray-grass a été mesurée.

Lors de l'incubation sans matière organique, le nitrate ajouté ne s'est que peu incorporé dans le sol, mais il a été observé des pertes importantes par dénitrification ainsi qu'une minéralisation de l'azote organique. En présence de paille, l'organisation atteint 30 p. 100 de l'azote minéral ajouté ; les pertes sont plus faibles et il en est de même si le traceur est apporté sous forme organique. L'incorporation du traceur dans la matière organique se fait essentiellement dans la fraction attribuée aux acides aminés.

Lors de la culture, le coefficient d'utilisation de l'engrais varie de 30 à 70 p. 100 et, avec la disparition quasi totale de l'azote minéral, il est noté une baisse de l'azote total et de l'azote quinze dans les diverses fractions organiques qui conservent un excès isotopique constant.

Introduction

Dans la majorité des sols, l'accroissement des rendements est lié à l'emploi des engrais minéraux et plus particulièrement des engrais azotés (Bremner et Hauck, 1974). L'utilisation de l'azote quinze a permis de constater que le prélèvement par les plantes ne dépasse que rarement 60 p. 100 de l'apport, tout au moins au cours de la première récolte (Allison *et al.*, 1966 ; Chabalier *et al.*, 1975 ; Legg et Allison, 1967). Dans ces conditions, de nombreux auteurs estiment que jusqu'à 40 p. 100 de l'engrais ajouté peuvent être perdus définitivement par volatilisation ou par drainage (Allison, 1966 ; Hauck, 1968). Il apparaît donc utile, pour ne pas dire indispensable, de définir des méthodes culturales qui, soit conduisent à un meilleur coefficient d'utilisation dés la première culture, soit permettent une fixation provisoire de l'azote dans la matière organique du sol de telle sorte que les pertes soient limitées. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance du comportement de l'azote minéral dans le sol. Pourtant, malgré l'emploi sans cesse accru de l'azote quinze, de nombreuses inconnues

subsistent et le manque d'informations précises sur ce sujet a fréquemment été signalé (Bremner et Hauck, 1974 ; Jansson, 1963 ; Sôchtig et Salfeld, 1976 ; Stewart, Johnson et Porter, 1963). Enfin, en raison même de la complexité du problème, il existe des données contradictoires puisque selon les auteurs le temps d'équilibre entre les différentes formes de la matière organique varie de quelques mois à plusieurs milliers d'années (Lespinat *et al.*, 1971 ; Stevenson, 1965). De même, alors que l'incorporation des composés minéraux azotés dans des formes organiques stables se produit rapidement (Stewart, Johnson et Porter, 1963), la minéralisation de ces constituants est lente et décroît lors des cultures successives (Broadbent et Nakashima, 1968). De tels phénomènes ne peuvent être valablement observés qu'à l'aide des traceurs ; en effet, seul l'emploi de l'azote quinze permet de réaliser un marquage sélectif de l'azote apporté au sol et, ainsi, de rendre compte avec certitude du turn-over de cet élément ainsi que des pertes éventuelles par volatilisation ou drainage. Il est nécessaire d'arriver à contrôler ces divers processus et, pour cela, il faut dans un premier temps en analyser soigneusement les mécanismes. Il est certain que, dans le sol, l'azote évolue continuellement entre des formes minérales et organiques et c'est pourquoi, dans l'expérience de laboratoire décrite ci-après, on a mesuré au cours d'une incubation de 18 mois, d'une part l'immobilisation de l'azote apporté sous forme nitrique avec ou sans apport de matière organique complémentaire et d'autre part les transformations de l'azote organique issu de parties aériennes de ray-grass marqué à l'azote quinze et enfoui dans ce sol. On a ensuite effectué une culture pour observer son influence sur le destin du traceur *.

Matériel et méthodes

Le sol utilisé est celui du château du domaine de Cadarache. C'est un sol brun calcaire dont le pH eau est de 8,0 et qui contient 1,04 p. 1 000 d'azote total. Cinq kilos de ce sol ont été mis à incuber à l'obscurité à 25 °C et à une humidité maintenue constante à 20 p. 100 (capacité de rétention à pF 3). Quatre traitements sont effectués avant l'incubation :

1) Témoin sans aucune addition,
2) Addition de 200 ppm d'azote nitrique marqué,
3) Addition de 200 ppm d'azote nitrique marqué + 1 p. 100 de paille de blé,
4) Addition de 200 ppm d'azote nitrique non marqué + 1 p. 100 de ray-grass marqué.

La quantité exacte d'azote nitrique marqué est de 196 ppm avec un excès en ^{15}N de 33,89 p. 100 (traitements 2 et 3). La quantité exacte d'azote nitrique non marqué est de 198 ppm (traitement 4) et la paille contient 0,49 p. 100 d'azote total (apport de 49 ppm N) avec un rapport C/N # 80. Le ray-grass enfoui (traitement 4) provient d'expériences antérieures réalisées avec des engrais minéraux marqués à l'azote quinze ; il a une teneur en azote total de 2,42 p, 100 (apport de 242 ppm N) avec un rapport C/N # 20. Son excès isotopique moyen est de 11,01 p. 100. Il a été séché à l'étuve et broyé finement avant d'être incorporé au sol.

---

* Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'action urgente DGRST : Evolution de l'azote des engrais dans les sols cultivés. Utilisation de l'azote 15 (décision d'aide n° 72.7 0674).

Afin de faciliter la comparaison des différents résultats entre eux, l'excès isotopique de ce ray-grass a été multiplié par 2,52 pour que la quantité d'azote quinze apportée soit exactement la même que celle introduite par les nitrates, soit 66,42 ppm. Toutes les déterminations isotopiques de ce traitement ont été multipliées par ce coefficient et, dans la suite de l'exposé, il n'est pris en compte que les valeurs ainsi corrigées. Cet artifice de calcul ne change en rien les conclusions auxquelles on peut aboutir.

Après 18 mois d'incubation, le sol a été séché à la température ambiante pendant 8 jours. Une culture de ray-grass a été réalisée sur 200 g de sol sec, avec 3 répétitions, en apportant une fumure complémentaire en phosphore et en potasse. Trois coupes sont effectuées respectivement après 3, 6 et 12 semaines. L'azote total des parties aériennes et des racines, séparées du sol en fin d'essai, a été déterminé suivant la méthode Kjeldahl.

L'azote du sol a été fractionné, avant et après culture, suivant la méthode ci-dessous dérivée de celle décrite par Stewart *et al.* (1963).

Après extraction par une solution de KCl l'ammonium échangeable est déterminé par distillation alcaline avec MgO.

Sur ce même échantillon, une autre distillation après addition d'alliage de Dewarda permet de titrer l'azote nitrique.

Sur le culot d'extraction (séparé par centrifugation et après rinçage à deux reprises avec de l'eau désionisée), on fait une agitation de 48 h avec HCl 12 N suivie d'une hydrolyse à reflux avec HCl 6N pendant 16 h. On récupère ainsi deux fractions, séparées par une nouvelle centrifugation :

— un résidu solide qui fournit la fraction insoluble dans l'acide (Nia) déterminée par Kjeldahl,

— une fraction liquide. Sur une aliquote de celle-ci, on mesure par distillation directe en milieu alcalin, la fraction azotée soluble dans l'acide et distillable (N sad). Par Kjeldahl sur une autre partie aliquote on obtient la fraction azotée soluble dans l'acide. En retranchant la fraction N sad de cette dernière, on détermine la fraction azotée soluble dans l'acide et qui est non distillable (N sand).

Chaque analyse est exécutée en triple ; pour le sol après culture, les répétitions sont obtenues par l'analyse du sol de chacun des pots. Enfin, sur chaque fraction azotée ainsi séparée, il est fait une détermination isotopique avec un spectromètre de masse VARIAN MAT modèle GD 150 (Guiraud et Pacchiani, 1973).

Afin de pouvoir être comparés plus facilement entre eux, tous les résultats sont exprimés en ppm.

Résultats et discussion

I. — *Effets de l'incubation ; état de l'azote dans le sol avant la culture*

a) *Transferts entre formes minérales et organiques.*

L'ensemble des résultats expérimentaux est porté au tableau 1. La fraction ammoniacale n'a pas été mentionnée car, pour tous ces essais, elle est nulle ou bien elle peut être considérée comme négligeable. Dans la première colonne, on a indiqué les valeurs mesurées lors du fractionnement de l'azote du sol préalablement à l'incubation et,

TABLEAU 1

Fractionnement de l'azote du sol après 18 mois d'incubation

			Traitements			
			1	2	3	4
		Départ	Témoin	+ N—NO_3 (196 ppm à 33,89 p. 100 ^{15}N)	+ N—NO_3 (196 ppm à 33,89 p. 100 ^{15}N) + 1 p. 100 paille (0,49 p. 100 N)	+ 1 p. 100 RG (2,42 p. 100 N à 27,75 p. 100 ^{15}N) + N—NO_3 (198 ppm)
N—NO_3^-	QN ppm	7	63	157	153	279
	E p. 100			24,68	19,52	10,18
	Q ^{15}N ppm			38,75	29,87	28,40
Nsad	QN ppm	380	395	378	420	408
	E p. 100			0,106	1,20	1,40
	Q ^{15}N ppm			0,40	5,04	5,71
Nsand	QN ppm	510	499	481	546	594
	E p. 100			0,101	2,74	2,96
	Q ^{15}N ppm			0,49	14,96	17,58
Nia	QN ppm	143	144	143	141	158
	E p. 100			0,037	0,646	1,32
	Q ^{15}N ppm			0,05	0,91	2,08
N total	Départ		1 040	1 236	1 272	1 465
	QN ppm	1 040	1 101	1 159	1 260	1 439
	Q ^{15}N			39,69	50,78	53,78
	p. 100 ^{15}N départ			59,8	76,5	81,0
	p. 100 ^{15}N initial			59,8	76,5	81,0

dans la partie bilan « N total », on a calculé la quantité globale d'azote pour chaque traitement à ce moment là.

Dans le sol non fertilisé (sol témoin, traitement 1), la quantité totale d'azote a peu varié au cours des 18 mois d'incubation et il en est de même des différentes fractions organiques ; on observe cependant une nitrification nette de 56 ppm.

Dans le traitement 2 qui a reçu au départ 196 ppm d'azote nitrique marqué, la quantité totale d'azote passe de 1 236 à 1 159 ppm accusant ainsi une perte de 77 ppm pour les 18 mois qu'a duré l'incubation. Là encore, les différentes fractions organiques ont peu varié et l'incorporation d'azote 15 s'y trouve limitée. C'est dans l'évolution de l'azote nitrique qu'il faut chercher les causes de la diminution de l'azote total. On constate en effet, entre le début et la fin de l'incubation, une baisse tout à la fois de la teneur (157 contre 203 ppm) et de l'excès isotopique (24,68 contre 32,72) des nitrates du sol. Ce dernier point ne peut être interprété que comme le résultat d'une minéralisation des formes organiques du sol, pour un montant donné par une relation telle que

$$157 \left(1 - \frac{24{,}68}{32{,}72}\right) = 39 \text{ ppm} .$$

La minéralisation concerne pour l'essentiel la fraction N sand. Par ailleurs, le bilan ^{15}N (66,42 ppm apportés contre 38,75 + 0,94 retrouvés respectivement dans les nitrates et l'azote organique) met en évidence une perte de 40,20 p. 100 qui traduit un processus de dénitrification portant sur 79 ppm (196 × 40,21) d'azote nitrique. Ce dernier chiffre est parfaitement compatible avec le déficit mesuré sur l'azote total, tandis que la différence 79 — 39 = 40 ppm est voisine de la baisse (46 ppm) directement observée sur les nitrates. Une telle coïncidence justifie l'hypothèse implicite selon laquelle la dénitrification a concerné en majeure partie le nitrate marqué.

Dans le traitement 3 qui correspond à l'apport simultané de 1 p. 100 de paille de blé et de 196 ppm d'azote nitrique marqué, le bilan global de l'azote n'indique pas de différence notable alors que, dans le même temps, le bilan de l'azote quinze fait état d'un déficit de 23,5 p. 100 : on sait que l'emploi d'azote quinze permet d'obtenir des bilans bien plus précis que ceux établis d'après les déterminations de l'N total par la méthode Kjeldahl. Les performances de cette dernière sont telles en effet que des écarts de ± 20 ppm- N entre deux échantillons de sol sont sans signification. Ainsi, en supposant encore que les pertes ici ont eu lieu par dénitrification à partir des nitrates ajoutés, la diminution d'azote correspondrait seulement à

$$\frac{196 \times 23{,}5}{100} = 46 \text{ ppm} .$$

Quant à l'azote nitrique, sa teneur ainsi que sa composition isotopique ont diminué au cours de l'incubation. Un calcul analogue à celui effectué pour le traitement 2 révèle une minéralisation de 62 ppm. Cependant le résultat le plus important de ces 18 mois d'incubation concerne l'incorporation de 31,5 p. 100 de l'azote quinze dans les trois fractions organiques de l'azote du sol.

Dans le traitement 4, l'addition d'azote marqué s'est faite sous forme organique (1 p. 100 de ray-grass enrichi en ^{15}N). Ce traitement permet les constatations suivantes :

La quantité d'azote nitrique est très élevée (279 ppm) ; au surplus cet azote est

devenu très fortement marqué (10,18 p. 100), ce qui traduit l'existence d'une minéralisation nette de 102 ppm d'azote en provenance du ray-grass enfoui.

Les pertes par dénitrification sont difficiles à évaluer puisque les nitrates ajoutés n'étaient pas marqués ; elles doivent de toutes façons être supérieures à 46 ppm valeur correspondant aux pertes d'azote 15 (12,64 ppm de ^{15}N issues d'un composé marqué à 27,75 p. 100).

Si l'on fait l'hypothèse que, pour ce traitement 4, il s'est produit une minéralisation de l'azote organique d'un sol à peu près identique à celle mesurée pour les trois autres, soit une cinquantaine de ppm, on peut estimer la diminution réelle de l'azote minéral à 205 (quantité initiale) + 102 (quantité minéralisée en provenance du ray-grass enfoui) + 50 (quantité estimée provenant du sol) — 279 (quantité mesurée en fin d'incubation) = 78 ppm. On retrouve donc seulement 32 ppm de plus que la valeur déterminée pour les pertes au moyen du traceur. Ces 32 ppm d'azote nitrique ont pu être perdues par dénitrification et (ou) incorporées dans l'azote organique du sol. Même en supposant une organisation de la totalité, on arrive à un maximum de 15 p. 100. Cette organisation est donc bien plus faible que pour le traitement 3 (31,5 p. 100) mais doit être supérieure à celle du traitement 2 (1,4 p. 100). La preuve aurait pu en être apportée par un cinquième traitement faisant intervenir des nitrates marqués et du ray-grass non marqué.

b) *Pertes d'azote en cours d'incubation.*

Comme cela a été signalé dans le paragraphe précédent il est impossible d'établir un bilan complet des pertes au moyen des seuls dosages chimiques. Le tableau 2 fait

TABLEAU 2

Pertes d'azote au cours de 18 mois d'incubation
Bilan ^{15}N (Quantité d'azote 15 ajoutée au départ 66,42 ppm)

	Traitement 2 sol + 196 ppm N—NO_3	Traitement 3 sol + 1 p. 100 paille + 196 ppm N—NO_3	Traitement 4 sol + 1 p. 100 R G + 198 ppm N—NO_3
Azote nitrique en ppm ..	38,75	29,87	28,4
Azote organique en ppm	0,94	20,91	25,37
Total en ppm	39,7	50,8	53,8
p. 100 ^{15}N initial	59,8	76,5	81,0
Perte en p. 100 du ^{15}N initial	40,2	23,5	19,0

état des analyses isotopiques qui permettent une mesure correcte. Les pertes d'azote sont générales et varient en fonction des divers traitements. Il est cependant intéressant de constater que c'est dans le traitement 2 (nitrates seuls) où la minéralisation et l'organisation sont les plus faibles que le déficit en azote quinze est le plus grand. En raison des conditions expérimentales utilisées ici où le drainage est impossible, *ces pertes sont*

obligatoirement le fait de la dénitrification qui peut donc se produire dans des conditions très variées (Allison, Carter et Sterling, 1960) *et non pas seulement en milieu strictement anaérobie et en présence d'une source de carbone exogène* (Jones, 1951). Au contraire, dans le cas présent, l'apport de paille a limité sensiblement les pertes (25 p. 100 au lieu de 40 p. 100 environ) en favorisant l'incorporation de l'azote quinze dans la matière organique.

C'est pour le traitement 4 que le déficit en azote quinze (19 p. 100) est le plus faible mais l'azote marqué avait été apporté sous forme organique qui n'est pas immédiatement accessible à la microflore dénitrifiante.

c) *Incorporation d'azote quinze dans la matière organique.*

Les résultats obtenus permettent les remarques suivantes :

• Pour le sol considéré, l'apport de nitrates seuls n'a abouti qu'à une organisation extrêmement faible (1,4 p. 100) de l'engrais et l'on ne discutera donc que les résultats des traitements 3 et 4 (fig. 1) où l'incorporation du traceur dans la matière organique est bien plus importante (35 p. 100 environ).

• Il faut noter que les résultats finaux ne sont pas très différents, que l'on ait incorporé des nitrates marqués et un substrat non marqué (paille) ou bien l'inverse (ray-grass marqué et nitrates non marqués).

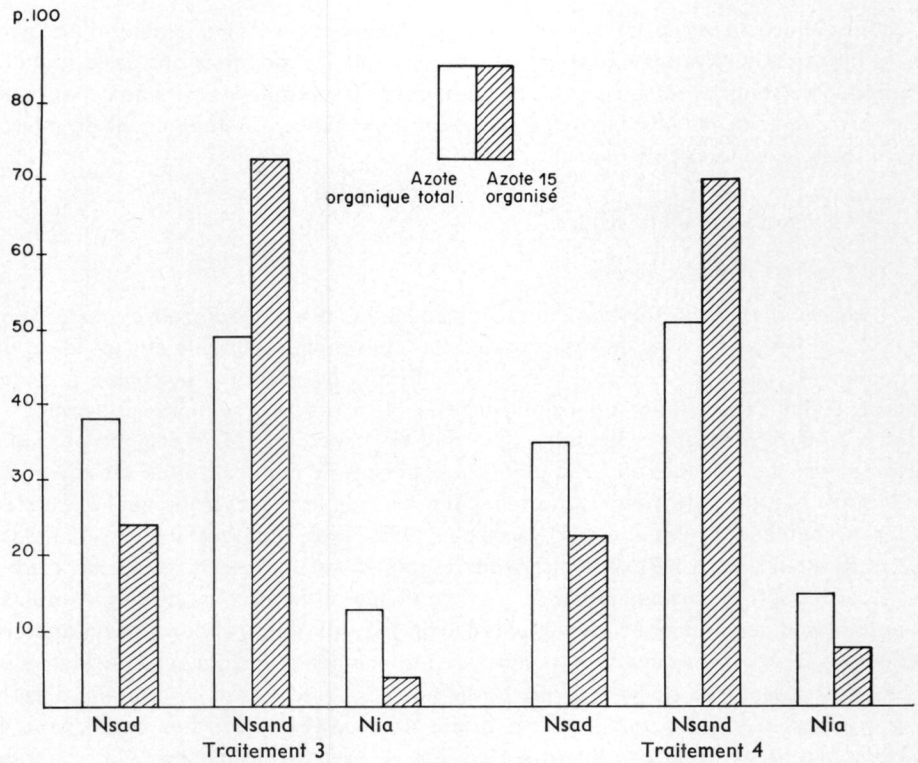


FIG. 1. — *Répartition de l'azote organique total et de l'azote 15 organisé dans les différentes fractions de la matière organique du sol*

• Pour le traitement 3 (apport de nitrates marqués + paille), on peut parler avec certitude d'organisation de l'azote, mais pour le traitement 4 (ray-grass marqué), il n'est pas possible de distinguer entre des composés azotés du ray-grass qui n'ont pas évolué de ceux ayant subi des transformations microbiennes successives (nitrification et réorganisation). Il est cependant probable que cette matière organique peu évoluée et à C/N faible (de l'ordre de 20) se dégrade rapidement (Guiraud et Fardeau, 1974) et nitrifie donc de façon intensive. Ce fait est confirmé par la quantité importante d'azote quinze retrouvée sous forme nitrique (près de 30 p. 100, tabl. 1) quantité qui est d'ailleurs diminuée des pertes dues à la dénitrification.

• Environ 70 p. 100 de l'azote réorganisé se trouve dans la fraction Nsand, attribuée aux acides aminés (Broadbent, 1968 ; Smirnov, Shilova et Kidin, 1971 ; Stewart, Porter et Johnson, 1963). Ce résultat confirme le turn-over plus rapide des acides aminés qui se traduit non seulement par une quantité plus grande d'azote quinze, mais aussi par un excès isotopique de cette fraction bien plus élevé que celui des autres, que ce soit la fraction Nsad ou surtout la fraction Nia (tabl. 1). La fraction Nsand est la seule pour laquelle le pourcentage d'azote quinze réorganisé soit supérieur à celui de l'azote total (cf. fig. 1).

II. — *Culture de ray-grass. Etat de l'azote du sol après la récolte*

Une culture de ray-grass a permis de juger l'effet des divers traitements d'une part sur la nutrition azotée des plantes et d'autre part sur les modifications de la matière organique du sol provoquées par les racines, dont on sait qu'elles ont une action multiple (prélèvement des nitrates, consommation d'oxygène, développement de micro-organismes, exsudation racinaire).

1. — *Résultats concernant la culture.*

a. *Exportation par la récolte.*

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3. Les quantités d'azote exportées par les trois coupes successives de ray-grass varient du simple au double et c'est le sol du traitement 4 (ray-grass enfoui + engrais minéral) qui conduit aux plus grandes valeurs. L'effet dépressif passager qui avait été noté lors de la première coupe dans un essai précédent à peu près similaire (Guiraud et Fardeau, 1974) a disparu par suite certainement de l'incubation préalable qui a permis la minéralisation du ray-grass enfoui (tabl. 1). Dans le même sens l'effet dépressif de la paille (traitement 3) est bien moins accentué que lors d'expériences peu différentes réalisées sur ce même sol (Guiraud et Berlier, 1969) et il disparaît complètement lors de la troisième coupe.

Pour les sols des traitements 2 et 3 qui contenaient au moment du semis (tabl. 1) une quantité d'azote nitrique identique (environ 155 ppm), les rendements en matière sèche sont à peu près semblables mais les prélèvements d'azote ont été bien plus faibles en présence de paille (120 mg au lieu de 150) ; de même, la quantité d'azote quinze exportée est plus faible tant en valeur absolue (14 mg au lieu de 27, tabl. 4) qu'en pourcentage de la quantité initiale présente sous forme nitrique (48 p. 100 au lieu de 70, tabl. 4). Comme cela a déjà été remarqué (Michustin, 1971), on peut penser que les pailles lors de leur décomposition dans le sol produisent des composés toxiques

TABLEAU 3

Bilan matière sèche et azote total dans les parties aériennes de la récolte
MS : Matière sèche QN : Quantité d'azote

	1re coupe			2e coupe			3e coupe				
	MS exportée en mg	p. 100 N	QN exportée en mg	MS exportée en mg	p. 100 N	QN exportée en mg	MS exportée en mg	p. 100 N	QN exportée en mg	MS exportée Σ 3 coupes	QN exportée Σ 3 coupes
Traitement 1 : sol témoin	2 300	3,1	70,7	1 330	1,4	18,1	950	1,0	9,6	4 580	98,4
Traitement 2 : sol + 196 ppm N—NO_3	2 305	5,2	119,7	1 665	1,3	21,5	750	1,0	7,8	4 720	149,0
Traitement 3 : sol + 1 p. 100 paille + 196 ppm N—NO_3	2 240	4,0	89,1	1 585	1,3	20,2	995	1,0	10,4	4 820	119,7
Traitement 4 : sol + 1 p. 100 R-G + 198 ppm N—NO_3	2 760	5,7	157,2	2 485	1,7	41,6	1 185	1,0	12,2	6 430	211

limitant la croissance des plantes ; les nitrates du sol sont alors disponibles et peuvent être plus facilement perdus par dénitrification ou lessivage.

Ces résultats semblent montrer l'intérêt, lorsque c'est techniquement possible, d'une humification de la paille préalablement à la culture. Ils demandent cependant à être confirmés et plus particulièrement, en ce qui concerne l'apparition de composés phytotoxiques lors de la décomposition de paille.

b. *Evolution de l'excès isotopique des plantes en cours de culture.*

Coefficient d'utilisation de l'azote quinze.

Les résultats sont reportés dans le tableau 4. Pour les traitements 2 et 3, on constate une diminution des excès isotopiques lors des différentes coupes, traduisant ainsi une nitrification qui se produit durant le cours de la culture. Cette nitrification est relativement moins importante que ne le laisserait supposer la chute de la teneur isotopique, car il est quasiment certain que la quantité de nitrates du sol a baissé fortement comme le montre la diminution des quantités d'azote exportées d'une part, et du pourcentage d'azote par rapport à la matière sèche d'autre part (tabl. 3) qui varie de 5,2 à 1,0 p. 100.

Pour le traitement 4, il est intéressant de constater que, dès la première coupe, l'excès isotopique des parties aériennes est supérieur à celui des nitrates du sol alors que ceux-ci y sont encore présents en grandes quantités ; l'écart s'accroît encore lors de la deuxième coupe (15,45 p. 100) et reste toujours positif dans la troisième (12,45). Ce résultat doit être attribué à une intervention de la rhizosphère (Dommergues et Mangenot, 1970). En effet, les microorganismes s'y trouvent fortement stimulés particulièrement après apport d'une matière organique à C/N bas et agissent sur la plante en mettant à sa disposition de petites molécules organiques, fortement marquées et directement issues du ray-grass enfoui, qui pourraient être absorbées par les racines.

En supposant que le coefficient d'utilisation des nitrates est égal à environ 70 p. 100 pour les trois coupes comme dans le traitement 2, on peut calculer la quantité d'azote provenant du ray-grass, absorbée par la culture : 27,55 (quantité d'azote 15 dans les parties aériennes) $=$ 0,7 $\times$ 279 $\times$ 10,18 (quantité ^{15}N issue des nitrates) $+$ x $\times$ 27,75 (quantité directement issue du ray-grass enfoui). On trouve ainsi une valeur de 28 mg d'azote qui aurait été absorbée sous forme organique par les racines. Une telle quantité représentant plus de 10 p. 100 de l'azote apporté par le ray-grass enfoui est loin d'être négligeable et suggère l'importance d'un tel processus dans l'alimentation azotée des plantes.

On remarque également qu'aucune des fractions azotées définies lors du fractionnement de la matière organique n'a un excès supérieur à celui de la culture (tabl. 1). Ceci permet donc d'affirmer que les parties ainsi séparées sont des mélanges de produits azotés de composition isotopique et surtout de biodégradabilité très variables et que cette méthode, comme bien d'autres (Paul et Gill, 1976), ne permet pas de mesurer avec précision le turn-over de l'azote dans le sol, ni surtout, dans le cas présent de distinguer l'azote organique du ray-grass de celui du sol.

Les coefficients d'utilisation de l'azote (tabl. 4) sont conformes à ceux donnés dans la littérature (Allison, 1966) et varient de 28 p. 100 pour le traitement avec la paille à 68 p. 100 pour le traitement ayant reçu une fumure minérale seule. Par contre, pour le traitement 4, si l'on se rapporte à la quantité d'azote quinze présente seulement sous

TABLEAU 4

Excès isotopique de l'azote des différentes coupes. Coefficient d'utilisation de l'azote par les plantes

	Excès isotopique des nitrates au départ de la culture	Excès isotopique 1re coupe	Excès isotopique 2e coupe	Excès isotopique 3e coupe	Quantité d'azote 15 exportée par la récolte en mg	Coefficient d'utilisation en p. 100 de la quantité de ^{15}N au début de la culture	Coefficient d'utilisation en p. 100 de la quantité de ^{15}N-nitrique au début de la culture
Traitement 2 :							
sol + 196 ppm N—NO_3	24,68	19,08	16,23	11,28	27,20	68,5	70,2
Traitement 3 :							
sol + 1 p. 100 paille + 196 ppm N—NO_3 ..	19,52	12,60	11,19	8,28	14,35	28,3	48,0
Traitement 4 :							
sol + 1 p. 100 RG + 198 ppm N—NO_3 ..	10,18	12,47	15,45	12,45	27,55	51,2	97,0

forme nitrique, on mesure un coefficient d'utilisation voisin de 100 p. 100. Une telle valeur, jamais approchée lors des essais avec des engrais minéraux en plein champ ou en pots (Allison, 1966), signifie que la plante s'est alimentée de façon non négligeable à partir d'une autre source azotée que celle fournie par les nitrates initialement présents dans le sol et confirme l'effet rhizosphérique déjà évoqué.

TABLEAU 5

Fractionnement de l'azote du sol après 18 mois d'incubation et une culture de ray-grass

		Départ	Témoin	+ N—NO_3	+ N—NO_3 + 1 p. 100 paille	+ 1 p. 100 RG + N—NO_3
N—NO_3^-	QN ppm	7	14	9	9	30
	E p. 100			0,597	1,33	2.02
	Q ^{15}N ppm			0,05	0,12	0,40
Nsad	QN ppm	380	373	348	362	392
	E p. 100			0,176	1,19	1,39
	Q ^{15}N ppm			0,61	4,31	5,45
Nsand	QN ppm	510	455	464	534	550
	E p. 100			0,530	2,75	3,0
	Q ^{15}N ppm			2,46	14,69	16,50
Nia	QN ppm	143	122	135	147	140
	E p. 100			0,113	0,70	1,29
	Q ^{15}N ppm			0,15	1,03	1,81
N total	QN ppm	1 040	964	956	1 052	1 102
	Q ^{15}N			3,27	20,15	24,16
	p. 100 ^{15}N départ			8,2	39,7	44,9
	p. 100 ^{15}N initial			4,9	30,4	36,4

2. — *Etat de l'azote du sol après la culture.*

Après une séparation aussi complète que possible des racines, l'azote du sol, en fin de culture, a de nouveau été fractionné suivant la méthode précédente (p. 3). Les résultats sont rassemblés dans le tableau 5.

Pour l'ensemble des traitements, on constate une baisse très importante de la quantité d'azote nitrique du sol, dont une partie a été absorbée par les plantes. On remarque en plus une chute considérable de l'excès isotopique qui traduit une nitrification de la matière organique du sol. On note d'ailleurs une diminution de l'azote organique total du sol de 88, 55, 64 et 78 ppm respectivement pour les traitements 1 à 4 (tabl. 1 et 5). Cette baisse est générale pour chacune des différentes fractions exceptée la fraction Nia du traitement 3. Les résultats sont identiques en ce qui concerne l'azote quinze sauf pour le traitement 2 ; dans ce traitement cependant, l'organisation de l'azote minéral apporté avait été négligeable durant les dix-huit mois de l'incubation préalable à la culture et de plus les quantités absolues mises en jeu sont très faibles (seulement 3 ppm d'azote 15 soit environ 5 p. 100 du traceur ajouté). Il est par ailleurs impossible de préciser si cet azote quinze provient de débris racinaires ou (et) d'azote incorporé dans la matière organique du sol.

Pour les traitements 3 et 4, malgré la forme différente de l'apport du traceur, *les excès isotopiques des trois fractions organiques restent pratiquement inchangés après la culture* (tabl. 6) quoique les quantités globales aient varié. Il en résulte que vis-à-vis

TABLEAU 6

Mesure des excès isotopiques des différentes fractions avant et après la culture de ray-gras

	Traitement 2 sol + $^{+}N—NO_3$		Traitement 3 sol + 1 p. 100 paille + $^{+}N—NO_3$		Traitement 4 sol + 1 p. 100 $^{+}$RG + $N—NO_3$	
	Avant culture	Après culture	Avant culture	Après culture	Avant culture	Après culture
$N—NO_3$	24,68	0,597	19,52	1,33	10,18	2,02
N Sad	0,106	0,176	1,20	1,19	1,40	1,39
N Sand	1,101	0,530	2,74	2,75	2,96	3,00
Nia	0,037	0,113	0,646	0,70	1,32	1,29

$N—NO_3$: azote nitrique,
N sad : azote soluble dans l'acide distillable
N sand : azote soluble dans l'acide non distillable,
Nia : azote insoluble dans l'acide distillable,

du fractionnement réalisé, l'incorporation de l'azote quinze dans la matière organique s'est faite de manière homogène.

Cette homogénéisation qui n'est certainement qu'apparente, peut être attribuée d'une part au mode de fractionnement qui est simple mais drastique et d'autre part à la longue période préalable d'incubation. Il est certes assez peu vraisemblable que le traceur, apporté sous forme minérale ou organique, ait pu s'incorporer dans les poly-

mères organiques déjà présents dans le sol (Freney et Simpson, 1969 ; Legg *et al.*, 1971) ; mais il a pu s'organiser sous forme de complexes nouveaux, identiques en composition à ceux préexistants (Stanford, Legg et Chichester, 1970).

3. — *Bilan de l'azote.*

a. *Bilan azote total.*

Le bilan « azote total » fait état pour tous les traitements d'une baisse importante de la quantité d'azote présente dans le sol après la culture (tabl. 7) ; cette diminution

TABLEAU 7

Bilan général de l'azote durant la culture

	Azote dans le sol au début de la culture		Azote dans la récolte (parties aériennes + racines)		Azote dans le sol après la culture		Pertes	
	N total en ppm	^{15}N en ppm	N total en ppm	^{15}N en ppm	N total en ppm	^{15}N en ppm	N total en ppm	^{15}N en ppm
Traitement 1 : sol témoin	1 101		112		964		25	
Traitement 2 : sol + N—NO_3	1 159	39,69	159	28,27	956	3,27	44	8,15
Traitement 3 : ..... sol + 1 p. 100 paille + N—NO_3 ..	1 260	50,78	131	15,20	1 052	20,15	77	15,43
Traitement 4 : sol + 1 p. 100 RG + N—NO_3	1 439	53,78	221	28,54	1 102	24,16	116	1,08

est la plus importante pour le traitement 4 (337 ppm) mais elle est compensée en partie tout au moins par les exportations de la récolte (221 ppm). Au total, ces pertes varient de 2 à 8 p. 100. Cependant, seuls les traitements 3 et 4 (c'est-à-dire les traitements avec un apport de paille ou de ray-grass, donc apport de matière organique ayant des C/N différents) permettent de maintenir le niveau initial de l'azote dans le sol (1 040 ppm).

b. *Bilan de l'azote quinze.*

Le tableau 7 fait état de pertes de l'ordre de 8 et 15 ppm lors de la culture, pour les traitements 2 et 3. Ces pertes sont attribuées à la dénitrification et non au lessivage car le peu d'eau qui a percolé au cours des arrosages successifs a été recyclé ; cette dénitrification a fortement été stimulée par les racines (Bailey, 1976 ; Brar, 1972 ; Stefanson, 1972 ; Woldendorp, 1963), puisque déjà, lors de l'incubation, on avait noté le développement de la microflore dénitrifiante.

Pour le traitement 4 par contre, on récupère la totalité de l'azote quinze présent au début de la culture ; ce résultat est surprenant étant donné la grande quantité d'isotope présente sous forme nitrique (28,4 ppm, tabl. 1) au moment du semis.

Au point de vue pertes totales de ^{15}N (incubation + culture), on arrive à des valeurs voisines de 50 p. 100 pour les traitements 2 et 3 et de 20 p. 100 pour le traitement 4. Ces pertes attribuées à la dénitrification sont élevées et témoignent de l'importance de ce processus dans le cycle de l'azote.

Conclusion

Dans cette expérience, on observe, après 18 mois d'incubation en absence de matière organique, une très faible organisation des nitrates marqués ajoutés, en même temps que des pertes très importantes par dénitrification et une minéralisation de l'azote organique. En présence d'une source de carbone exogène, ces deux mécanismes se produisent également mais, en plus, une grande partie de l'azote minéral ajouté est immobilisée sous forme organique ; une telle incorporation se fait de façon homogène (dans chaque fraction considérée) en regard du mode de fractionnement utilisé pour l'étude de l'azote du sol.

La culture de ray-grass successive à l'incubation met en évidence un effet rhizosphérique (qu'il importe de confirmer) ainsi qu'une atténuation de l'effet dépressif de la paille enfouie 18 mois auparavant ; cette atténuation est attribuée à l'humification préalable qui se produit durant l'incubation. Dans cet essai, l'emploi de l'azote quinze se confirme indispensable pour mettre en évidence avec une précision accrue l'importance et l'ampleur des phénomènes touchant à l'évolution de l'azote dans le sol sous différentes conditions expérimentales ; cette évolution dépend en effet de nombreux facteurs qui agissent simultanément et, bien souvent, en sens inverse les uns des autres tels par exemple nitrification et dénitrification. Cependant la concomitance n'est peut-être qu'apparente étant donné que les déterminations portent sur des laps de temps relativement longs et concernent des sites (rhizosphère par exemple) qui peuvent être différents. Si l'un ou l'autre de ces deux processus est favorisé, et cela peut se produire pour des conditions expérimentales relativement proches, les résultats expérimentaux diffèreront notablement : c'est pourquoi les résultats de la littérature semblent souvent si contradictoires. L'expérience décrite apporte quelques éléments de réponse pour le cas particulier pris en compte mais il a été nécessaire de faire de nombreuses hypothèses et certains phénomènes ne peuvent encore recevoir d'explications.

Elle permet surtout de mettre l'accent sur les démarches qui restent à entreprendre dans l'étude de la matière organique du sol. Outre l'utilisation des isotopes il faut faire des études cinétiques précises et suffisamment rapprochées pour suivre le destin du traceur, apporté sous forme minérale ou organique. Dans ce dernier cas, un double marquage C et N permettrait de comparer l'évolution des différentes fractions. Mais, de toutes façons, ces expériences n'atteindront leur pleine efficacité que dans la mesure où une méthode de fractionnement fine et complète aura été mise au point pour caractériser les fractions organiques directement concernées par le turn-over.

De telles études exigent donc des analyses chimiques et isotopiques de plus en plus nombreuses qui impliquent une amélioration et une simplification accrue des moyens analytiques actuellement mis en œuvre.

Reçu pour publication en juillet 1977.

Summary

^{15}N study on mineralization and organization of nitrogen in the soil

A soil sample was incubated during 18 months with : 1) Calcium nitrate labelled with ^{15}N, straw being or not added. 2) Labelled ray-grass. Incorporation of tracer in organic matter was measured before and after ray-grass grown.

During incubation without organic matter the added nitrate incorporation in the soil was slight but important losses by denitrification and organic nitrogen mineralization were observed. When straw is added the organization amounts for 30 p. 100 of mineral nitrogen added and losses of ^{15}N are slighter : it is the same when the tracer is supplied in the organic form. The tracer incorporation in the organic form is mainly done in the fraction assigned to aminoacids.

In the soil under growing the coefficient of utilization of the fertilizer varies from 30 to 70 p. 100. It is also observed the quite complete disappearance of the mineral nitrogen and a decrease of both total nitrogen and 15 nitrogen in the various organic fractions isotopic excess of which remained constant.

Zusammenfassung

Organisation und Mineralisation von Stickstoff in Kalkböden
Untersuchung an Hand von Stickstoff 15

Eine Bodenprobe wurde 18 Monate lang mit N 15 markiertem Kalziumnitrat, mit oder ohne Strohbeigabe oder mit markiertem Raygras bebrütet. Die Beifügung des Spurenelements unter die organischen Stoffewurde vor und mach einer Raygraskultur gemessen. Ohne organische Masse hat sich das beigegebene Nitrat bei der Inkubation nur schwach mit dem Boden verbunden. Man konnte jedohc erhebliche Verluste auf Grund der Entnitrifikation beobachten sowie eine Mineralisation des organischen Stickstoffs.

Bei Strohzugabe erreicht die Verwertung des beigefügten mineralischen Stickstoffs 30 p. 100. Die Verluste sind geringer, was auch der Fall ist, wenn das Spurenelement in organischer Form beigemengt wird. Das Spurenelement wird hauptsächlich im Aminosäuren zugehörigen Teil den organischen Stoffen beigemengt.

Beim Anbau liegt der Verwertungskoeffizient zwischen 30 and 70 p. 100, und bei fast völligem Verschwinden des mineralischen Stickstoffes tritt eine Verminderung des gesamten Stickstoffes und des Stickstoffes 15 ein in den verschiedenen organischen Fraktionen, die ein konstantes isotopisches Übermass beibehalten.

РЕЗЮМЕ

Превращение минерального азота в органический и минерализация органического азота в известковой почве.
Nзучение с помощью изотопа N^{15}

ГИРО Г., ФАРДО Ж.К.

Образец почвы инкубировался в течении 18-ти месяцев с нитратом кальция, обогащенным N^{15}, в присутствии соломы, или без нее, или-же с рай-грассом меченным N^{15}. Инкорпорация изотопа в органическое вещество определялась до и после культуры рай-грасса.

В течении инкубации без органического вещества, нитрат, прибавленный в почву плохо инкорпорировался ею, и, напротив, наблюдались крупные потери азота вызванные денитрификацией, и минерализация органического азота. В присутствии соломы, превращение прибавленного минерального азота в органический достигала 30-ти р. 100 ; потери азота были более слабыми, даже в случае внесения изотопа N^{15} в органической форме. -N^{15} инкорпорировался главным образом в аминокислотную фракцию органического вещества.

При культуре рай-грасса коэффициент потребления удобрения достигал от 30-ти, до 70-ти р. 100 при этом отмечалось почти полное исчезновение минерального азота и уменьшение процентного содержания общего азота и изотопа N^{15} из разных органических фракций, сохранявших при этом постоянный изотопный избыток.

Références bibliographiques

ALLISON F. E., CARTER J. N., STERLING L. D., 1960. The effect of partial pressure of oxygen denitrification in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **24,** 283-285.

ALLISON F. E., 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Adv. Agron.*, **18,** 219-258.

BAILEY L. D., 1976. Effects of temperature and root on denitrification in a soil. *Can. J. Soil Sci.*, **56,** 79-87.

BRAR S. S., 1972. Influence of roots on denitrification. *Plant and Soil*, **36,** 713-715.

BREMNER J. M., HAUCK R. D., 1974. Perspectives in soil and fertilizer nitrogen research. 10e *Congrès International de la Science du sol*, Moscou IX, 13-19.

BROADBENT F. E., 1968. Nitrogen immobilization in relation to N-containing fractions of soil organic matter. *Isotopes and radiations in soil organic matter studies* ; Vienne (SM-106/38), 131-139.

BROADBENT F. E., NAKASHIMA T., 1968. Plant uptake and residual value of six tagged nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **32,** 388-392.

CHABALIER P. F., GUIRAUD G., PICHOT J., RÉMY J. C., 1975. *Evolution de l'azote des engrais dans les sols cultivés. Utilisation de l'azote quinze.* Compte tendu de fin d'études de recherche financée par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, no 72.7.0674.

DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. *Ecologie microbienne du sol.* Masson et Cie Editeurs, 548-594.

FRENEY J. R., SIMPSON J. R., 1969. The mineralization of nitrogen from some organic fractions in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1, 241-251.

GUIRAUD G., BERLIER Y., 1969. Etude avec l'aide d'azote quinze de la dénitrification dans le sol notamment en présence de paille enfouie. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **55,** 1000-1007.

GUIRAUD G., FARDEAU J. C., 1974. Détermination au moyen de ^{15}N de l'utilisation par une culture de ray-grass d'azote provenant de matériel végétal enfoui. 10e *Congrès International de la Science du sol.* Moscou IX, 106-116.

GUIRAUD G., PACCHIANI L., 1973. Acquisition et traitement en temps réel de données numériques d'analyses isotopiques d'azote par spectrométrie de masse. *Analusis*, **2** (4), 282-286.

HAUCK R. D., 1968. Soil and fertilizer nitrogen. A review of recent work and commentary. 9e *Congrès International de la Science du sol.* Adelaïde II, 475-486.

JANSSON S. L., 1963. Nitrogen transformation in soil organic matter. *The use of isotopes in soil organic matter studies.* Brunswick, 293-296.

JONES E. J., 1951. Loss of elemental nitrogen from soils under anaerobic conditions. *Soil Sci.*, **71,** 193-196.

LEGG J. O., ALLISON F. E., 1967. A tracer study of nitrogen balance and residual nitrogen availability with 12 soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, **31,** 403-406.

LEGG J. O., CHICHESTER F. W., STANFORD G., DEMAR W. H., 1971. Incorporation of ^{15}N-tagged mineral nitrogen into stable forms of soil organic nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **35,** 273-276.

LESPINAT P. A., HÉTIER J. M., THOMANN C., CHONET T., 1976. Utilisation de maïs mur uniformément marqué au ^{14}C pour l'étude de la matière organique de trois sols (Andosol, sol brun, sol ferrallitique). *Sci. Sol.* 53-66.

MICHUSTIN E. N., 1971. Use of straw as fertilizer. *Agrokhimiya*, **8,** 49-54.

PAUL E. A. and MC GILL W. B., 1976. Turn over of microbial biomass, plant residues and soil humic constituents under field conditions. *International Symposium on soil organic matter studies*, Brunswick SM 211/17.

SMIRNOV P. M., SHILOVA, E. J., KIDIN V. V., 1971. Immobilisation d'azote dans le sol lors de l'apport d'engrais et de résidus végétaux marqués à l'azote quinze. *Dokl. T. S. Kh. A*, **162,** 167-173.

SÖCHTIG H., SALFELD J. C., 1976. Studies on the dynamics of organic forms of nitrogen in the nitrogen cycle of soil. *International symposium on soil organic matter studies*, Brunswick SM 211/26.

STANFORD G., LEGG J. O., CHICHESTER F. W., 1970. Transformations of fertilizer nitrogen in soil. I Interpretations based on chemical extractions of labelled and unlabelled nitrogen. *Plant and Soil*, **33,** 425-435.

STEFANSON R. C., 1972. Soil denitrification in sealed soil-plant systems I Effect of plants, soil water content and soil organic matter content. *Plant and Soil*, **33,** 113-127.

STEVENSON F. J., 1965. Origin and distribution of nitrogen in soil in « *Soil Nitrogen* » Edited by Bartholomew W. V. and Clark F. E., 1-42.

STEWART B. A., JOHNSON D. D., PORTER L. K., 1963. The availability of fertilizer nitrogen immobilized during decomposition of straw. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27,** 656-659.

STEWART B. A., PORTER L. K., JOHNSON D. D., 1963. Immobilization and mineralization of nitrogen in several organic fractions of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27,** 302-304.

WOLDENDORP J. W., 1963. *The influence of living plants on denitrification. Medd. Landbouwhogesch.* Wageningen, **63,** 1-100.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 379-389.

Sélection de souches de *Rhizobium japonicum* d'après leur compétitivité pour l'infection

B. LAGACHERIE, R. HUGOT et Noëlle AMARGER

avec la collaboration technique de G. SOMMER et B. MOHAEMEN

Laboratoire de Microbiologie des Sols,
Centre de Recherches de Dijon, I.N.R.A.,
BV 1540. 21034 Dijon Cedex

Résumé

La compétitivité pour l'infection, ou aptitude à former des nodosités en présence d'autres souches de même spécificité, de 13 souches de *Rhizobium japonicum* a été mesurée. On a pour cela comparé le poids sec donné par des soja inoculés avec une souche efficiente, au poids sec de plantes inoculées par un mélange de la même souche efficiente avec une souche inefficiente. Les souches ont ainsi pu être classées.

La compétitivité pour l'infection de quatre de ces souches a été comparée à leur pouvoir compétitif déterminé par le nombre de nodosités qu'elles forment lorsqu'elles sont introduites au semis dans un sol pourvu de *Rhizobium* de même spécificité. Compétitivité pour l'infection et pouvoir compétitif global varient dans le même sens. La nécessité d'entreprendre la sélection des *Rhizobium japonicum* d'après leur compétitivité pour l'infection est discutée.

Introduction

Pour assurer la réussite d'une culture de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) en France, il est indispensable d'inoculer les semences avec *Rhizobium japonicum*, naturellement absent des sols (Demolon et Dunez, 1939; Lagacherie, 1973).

Une partie des cellules de *Rhizobium* apportées lors du semis s'installe dans la rhizosphère de la plante ; à maturité, la dégénérescence des nodosités provoque la libération des bactéries. Ainsi s'implante dans la microflore tellurique un nouveau groupe microbien dont l'importance et l'évolution vont dépendre des conditions physico-chimiques et biologiques rencontrées dans le sol.

Dans l'avenir l'utilisation de souches de *Rhizobium* plus efficientes menace d'être inopérante pour le soja car ces souches entreront en compétition pour la formation des nodosités avec les souches ayant contaminé le sol lors des cultures précédentes, c'est la situation dans laquelle on se trouve actuellement aux Etats-Unis.

Cette compétition, influençable par le génotype du partenaire végétal (Caldwell et Vest, 1968), résulte de la combinaison de deux caractères distincts de la souche :

- Sa compétence saprophytique qui traduit son aptitude à survivre et à se multiplier dans un sol donné (Chatel, Greenwood et Parker, 1968).
- Son aptitude à former des nodosités en présence de souches de même spécificité (Means, Johnson et Erdman, 1961), aptitude indépendante de son activité fixatrice (Amarger, résultats non publiés) et que nous appellerons compétitivité pour l'infection.

Nous avons voulu déterminer si la compétitivité pour l'infection de souches de *R. japonicum* variait dans le même sens que la compétition appréciée globalement et si elle pouvait servir de critère de sélection.

Méthodes et techniques

1. — *Méthodes*

La méthode utilisée pour classer les souches de *Rhizobium* en fonction de leur compétitivité pour l'infection est celle mise au point au laboratoire : en mélange avec une souche non fixatrice G eff$^-$, une souche fixatrice G eff$^+$ forme les seules nodosités efficaces ; diverses souches G eff$^+$ de compétitivité pour l'infection différente et d'activité fixatrice équivalente, en même proportion avec la souche G eff$^-$, forment des nodosités en nombre différent, ce qui se traduit par des fixations d'azote différentes ; le rapport de l'azote fixé par G eff$^+$ mélangée à G eff$^-$ à l'azote fixé par G eff$^+$ seule, mesure ces différences d'implantation quel que soit le potentiel fixateur des souches comparées.

En tenant compte de la corrélation existant entre la quantité d'azote contenue dans les parties aériennes de la plante et leur poids, ce rapport peut être simplifié sous la forme

$$\frac{\text{Matière sèche (G eff}^+ + \text{G eff}^-)}{\text{Matière sèche (G eff}^+)} \times 100 = \text{coefficient de compétitivité pour l'infection.}$$

Afin d'estimer la valeur du classement ainsi obtenu, le coefficient de compétitivité pour l'infection de différentes souches a été comparé à l'aptitude de ces souches à former des nodosités lorsqu'elles sont apportées par inoculation des semences dans un sol contenant déjà des *Rhizobium* de même spécificité.

2. — *Souches*

L'origine des souches de *R. japonicum* utilisées dans les essais est reportée dans le tableau 1 ; la souche G1 est une souche qui forme des nodosités non fixatrices sur les variétés de soja utilisées, Amsoy, Adepta, Swift et Wells (le poids sec des parties aériennes de soja inoculées avec G1 est égal à celui des sojas non inoculés).

Pour chaque essai, les différentes souches ont été cultivées en milieu liquide agité (Iswaran, Graham et Jauhri, 1969) pendant cinq jours à 30 °C ; les dénombrements de bactéries viables ont été effectués par la technique des dilutions successives et culture sur milieu mannitol-eau de levure gélosé (Vincent, 1970).

TABLEAU 1

Origine des souches de R. japonicum

Souche	Origine	
G_1	3I1 B110	USDA Beltsville (1967)
G_3	3I1 B138	USDA Beltsville
G_8	S_4	IRAT Madagascar
G_{20}	Isolement inoculum USA	
G_{34}	5011	IPEACS Brésil
G_{36}	5017	IPEACS Brésil
G_{44}	721	INIA Madrid
G_{47}	725	INIA Madrid
G_{49}	SB16	IARI New-Delhi
G_{60}	3I1 B6	USDA Beltsville
G_{62}	3I1 B110	USDA Beltsville (1972)
G_{69}	Stig	IZPZ Belgrade
G_{71}	Ljub 65	IZPZ Belgrade
G_{72}	Zsn	IZPZ Belgrade

3. — *Conditions de croissance des plantes*

Les essais ont été réalisés en serre à Dijon en 1974 (essais I et III) et 1975 (essai II). Les plantes (3 par pot) ont été cultivées dans des pots en matière plastique (volume d'1,5 l pour les essais I et III ; 4,5 l pour l'essai II) ; le support utilisé était un sable stérilisé pour l'essai I (sable extra siliceux B 4-Silices et réfractaires de la Méditerranée-Marseille), remplacé dans l'essai II par de la perlite (Perlisol 40-La Vermiculite et la Perlite-Nanterre), choisie pour son fort pouvoir de rétention hydrique.

La solution minérale d'arrosage sans azote a la composition suivante :

K_2HPO_4	: 140 mg	$MgSO_4$, 7 H_2O	: 200 mg
$CaCl_2$	: 220 mg	K_2SO_4	: 70 mg
Fe^{+++}	: 10 mg	H_3BO_3	: 2 mg
$MnSO_4$, H_2O	: 1,8 mg	$ZnSO_4$, 7 H_2O	: 0,02 mg
$CuSO_4$, 5 H_2O	: 0,08 mg	Na_2MoO_4, 2 H_2O	: 0,25 mg
$(NO_3)_2Co$, 6 H_2O	: traces		

pour un litre d'eau déminéralisée.

4. — *Réalisation*

— Essais I et II.

Les pots ont été inoculés au moment du semis par une suspension aqueuse de bactéries ayant poussées sur milieu liquide agité qui apportait une souche fixatrice, soit seule, soit en mélange avec la souche non fixatrice G_1 (tabl. 2).

Dans l'essai I, huit souches ont été testées sur la variété Amsoy 71. Dans l'essai II, dix souches (dont cinq de l'essai I) ont été testées sur la variété Amsoy 71 et quatre d'entre elles (G_3, G_{44}, G_{49} et G_{69}) sur les variétés Adepta, Swift et Wells.

TABLEAU 2

Compositions des inoculum utilisés pour les essais I et II

	Traitements	
	Souche fixatrice G eff+ seule	Souche fixatrice G eff+ en mélange avec la souche G_1 non fixatrice (1)
	Nombre de bactéries par pot	$\frac{\text{G eff+}}{G_1}$ (p. 100)
Essai I		
G_3	4,0 (± 1,1).10^7	0,89
G_{36}	2,3 (± 0,7).10^7	0,51
G_{44}	4,6 (± 1,3).10^7	1,02
G_{49}	4,0 (± 1,1).10^7	0,89
G_{60}	4,6 (± 1,3).10^7	1,02
G_{62}	3,8 (± 1,1).10^7	0,85
G_{69}	4,5 (± 1,3).10^7	1,00
G_{71}	5,9 (± 1,6).10^7	1,31
Essai II		
G_3	10,3 (± 2,9).10^7	0,80
G_8	8,4 (± 2,4).10^7	0,65
G_{20}	6,4 (± 1,9).10^7	0,50
G_{44}	4,4 (± 1,3).10^7	0,34
G_{47}	7,8 (± 2,1).10^7	0,57
G_{49}	7,5 (± 2,2).10^7	0,58
G_{60}	10,1 (± 2,9).10^7	0,78
G_{62}	10,1 (± 2,9).10^7	0,78
G_{72}	10,4 (± 2,9).10^7	0,81

(1) Le nombre de bactéries G eff+ était le même que dans le traitement G eff+ seul; le nombre de bactéries G eff− était de 4,5 (± 1,4).10^9 pour l'essai I et de 12,9 ± (4,0).10^9 pour l'essai II.

La récolte a été effectuée dix semaines après semis. Les parties aériennes ont été séchées puis pesées, les coefficients de compétitivité pour l'infection, calculés et comparés.

Un comptage des nodosités faites par les souches fixatrices en présence de la souche G_1 a complété les observations réalisées sur l'essai II ; ce comptage est basé sur la différence de couleur externe entre nodosités G_1, rouge-brun, et nodosités fixatrices, jaune-orangé clair; une indétermination existe sur la couleur des nodosités les plus petites.

— *Essai III.*

Les pots contenaient un kg de terre (limon argileux de Dijon ph 7,5) ; cette terre, dépourvue naturellement de *R. japonicum*, avait été infectée huit jours avant répartition en pot et semis, par la souche G_3S_{10}, fixatrice, mutant spontané de la souche G_3, résistant à la streptomycine (500 mg/ml) (Obaton, 1971).

Au semis, chaque pot contenait 1,1.10^6 (1,7.10^5 < — < 7,3.10^6) bactéries G_3S_{10} estimées par dénombrement sur plante en adaptant au soja la technique de Gibson (1963).

Les graines (Var. Amsoy 71) ont été inoculées au semis par 10 ml d'une suspension bactérienne contenant à la dose 1 : 4×10^7, à la dose 2 : 4×10^8 *Rhizobium* par pot, de souches G_3, G_{49}, G_{60} ou G_{69}.

Neuf semaines après semis, 30 nodosités ont été prélevées au hasard dans chaque pot ; leur origine a été déterminée par croissance sur milieu contenant de la streptomycine, après désinfection extérieure par trempage 3 mn dans $HgCl_2$ à 2 p. 1 000 et rinçage à l'eau stérile puis broyage.

Résultats

Ils sont résumés dans les tableaux 3 à 7 et la figure 1.

1. — *Compétitivité pour l'infection de différentes souches de R. japonicum mesurée sur la variété Amsoy*

Dans l'essai I on note que les capacités fixatrices des souches, mise à part G_{71}, sont équivalentes, comme l'indiquent les poids des parties aériennes récoltées (tabl. 3).

TABLEAU 3

Poids sec des parties aériennes de soja (var. Amsoy 71) cultivé en présence d'une souche de Rhizobium fixatrice G eff⁺ et du mélange souche fixatrice G eff⁺ + souche non fixatrice G_1 (essai I)

Souche	Poids des parties aériennes (matière sèche en g par pot) (1)		Coefficient de compétitivité pour l'infection (3)
	G eff⁺	G eff⁺ + G_1 (2)	
G_3	15,7	6,1	38,9 ab
G_{36}	14,7	6,3	44,8 a
G_{44}	14,2	2,2	15,8 d
G_{49}	14,5	3,3	22,9 cd
G_{60}	14,9	2,7	17,8 d
G_{62}	15,7	3,2	20,6 cd
G_{69}	13,8	4,8	35,0 ab
G_{71}	8,7	2,6	32,0 bc

(1) Moyenne de 4 répétitions ; coefficient de variation 9,7 p. 100.
(2) Souche G_1 seule = 1,7 g.
(3) Les valeurs suivies par la même lettre ne diffèrent pas significativement au niveau de probabilité P = 0,05.

A compétitivité pour l'infection analogue, les productions de matières sèches de ces souches en présence de la souche G_1 devraient être comparables. Or, quatre semaines après semis, les différences de végétation entre traitement peuvent être observées en présence de G_1 et vont s'accentuer jusqu'à la récolte. Ce sont ces comportements différents que traduisent les coefficients de compétitivité pour l'infection dont les valeurs varient de 17,8 à 44,8.

Le choix du rapport 1-100 entre souche fixatrice et souche non fixatrice G_1^r dans l'inoculum se révèle satisfaisant, la gamme des résultats étant assez étalée pour appré-

cier des comportements différents ; la richesse en souche fixatrice (de l'ordre de 10^7 bactéries par pot) permet une fixation non limitante lorsque la souche est seule.

Dans l'essai II, on note qu'avec la variété Amsoy 71 (tabl. 4) les conditions expérimentales ont provoqué une croissance des plantes plus importante que dans l'essai 1 ; les coefficients de compétitivité pour l'infection des 10 souches se groupent en deux classes distinctes. Parmi les souches déjà testées, le coefficient de la souche G_3 est élevé, ceux des quatre souches G_{44}, G_{49}, G_{60} et G_{62} sont faibles ; les nouvelles souches se répartissent entre les valeurs extrêmes 29,1-6,6.

TABLEAU 4

Poids sec des parties aériennes de soja (var. Amsoy 71) cultivé en présence d'une souche de Rhizobium fixatrice G eff$^+$ et du mélange souche fixatrice G eff$^+$ + souche non fixatrice G_1 (essai II)

Souche	Poids des parties aériennes (matière sèche en g par pot) (1)		Coefficient de compétitivité pour l'infection (3)
	G eff$^+$	G eff$^+$ + G_1 (2)	
G_3	38,6	11,2	29,1 a
G_8	38,4	9,7	24,7 a
G_{20}	40,1	8,9	22,5 a
G_{34}	36,7	9,4	26,0 a
G_{44}	27,2	2,9	10,6 b
G_{47}	29,3	3,2	10,8 b
G_{49}	37,6	2,8	7,3 b
G_{60}	34,2	2,8	8,0 b
G_{62}	39,7	2,5	6,6 b
G_{72}	31,3	2,6	8,4 b

(1) Moyenne de 3 répétitions; coefficient de variation : 9,7 p. 100.
(2) Souche G_1 seule : 2,0 g.
(3) Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement au niveau de probabilité P = 0,05.

2. — *Compétitivité pour l'infection de 4 souches de* R. japonicum *sur 4 variétés de soja*

Avec les variétés Adepta, Swift et Wells, le comportement des souches n'est pas significativement différent de celui observé sur la variété Amsoy 71 (tabl. 5).

Les coefficients de compétitivité pour l'infection conservent des valeurs analogues d'une variété à l'autre. L'examen des racines des plantes inoculées par les mélanges G eff$^+$ + G_1, compte tenu des caractéristiques de nodulation de chaque variété, confirme et illustre ces résultats (fig. 1).

3. — *Compétitivité pour l'infection et compétitivité globale*

Lors de l'essai III, les souches G_3, G_{49}, G_{60}, G_{69}, apportées par inoculation à des graines semées dans un sol contenant une souche de *R. japonicum* fixatrice repérable se sont comportées de façon variable sur la variété de soja Amsoy 71 (tabl. 6). Le pourcentage de nodosités formées par les souches apportées diffère suivant les souches : G_3 et G_{69} forment en moyenne plus de nodosités que G_{49} et G_{60}.

TABLEAU 5

Coefficients de compétitivité pour l'infection de différentes souches de Rhizobium pour différentes variétés de soja (essai II)

	Adepta	Amsoy 71	Swift	Wells
G_3	25,9	29,1	22,6	28,5
G_{44}	9,5	10,6	8,3	9,3
G_{49}	9,1	7,1	5,7	6,9
G_{60}	9,1	8,0	10,5	15,4

Source de variation	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Blocs	150	2	75	2,78
Variété	64	3	21	0,79
Erreur variété	163	6	27	
Souche	2 788	3	929	41,7 **
Variété × souche	139	9	15	0,69
Erreur souche	535	24	22	

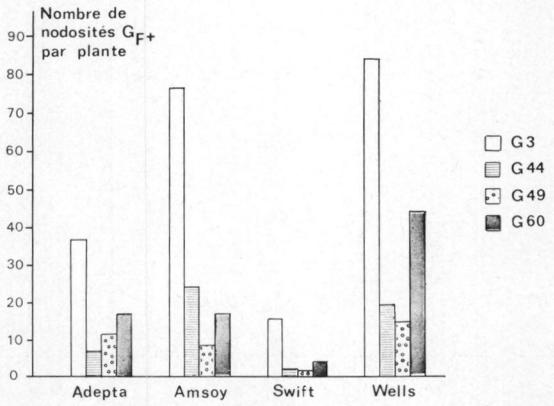


FIG. 1. — *Influence de la variété de Soja sur le nombre de nodosités formées par la souche fixatrice lorsque l'inoculum apporte le mélange souche fixatrice + souche non fixatrice.*

Discussion

Les résultats des deux premiers essais nous montrent qu'en présence d'une même souche de *R. japonicum* inefficiente, les souches de *Rhizobium* efficientes de même spécificité forment plus ou moins de nodosités sur la plante hôte, permettant ainsi une plus ou moins grande fixation d'azote, ce qui se traduit par un développement différent de la plante. Il est ainsi possible de classer les souches de *R. japonicum* suivant leur compétitivité pour l'infection.

TABLEAU 6

Pourcentage de nodosités formées sur racines de soja (var. Amsoy 71) par des souches de Rhizobium apportées par inoculation au semis dans un sol contenant 1,25.10^3 *cellules de* R. japonicum *par gramme de sol sec* (1,1.10^6 *par pot*)

	Pourcentage de nodosités formées par la souche apportée (1)	Coefficient de compétitivité pour l'infection	
		essai I	essai II
G_3	97,1 a	38,9	29,1
G_{49}	87,3 c	22,9	7,3
G_{60}	87,1 c	17,8	8,0
G_{69}	94,6 b	35,0	

(1) Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement au niveau de probabilité P = 0,05.

Les coefficients de compétitivité pour l'infection obtenus dans les deux essais sont rassemblés dans le tableau 7. Pour les souches communes aux deux essais, on constate que, bien que les valeurs absolues de ces coefficients diffèrent d'une expérience à l'autre, les deux classements obtenus sont fortement corrélés (r = 0,91).

TABLEAU 7

Coefficients de compétitivité pour l'infection de 13 *souches de* R. japonicum

	1974	1975
G_3	38,9	29,1
G_8	—	24,7
G_{20}	—	22,5
G_{34}	—	26,0
G_{36}	44,8	—
G_{69}	35,0	—
G_{71}	34,5	—
G_{44}	15,8	10,6
G_{47}	—	10,8
G_{49}	22,9	7,3
G_{60}	17,8	8,0
G_{62}	20,6	6,6
G_{72}	—	8,4

Coefficient de corrélation entre les classements de G_3, G_{44}, G_{49}, G_{60}, G_{62} en 1974 et en 1975 = 0,905.

Le comportement des quatre souches G_3, G_{49}, G_{60} et G_{62} reste le même sur les quatre variétés testées : Amsoy 71, Adepta, Swift et Wells. Ceci ne réfute pas d'éventuelles interactions souche × variété sur l'expression de la compétitivité pour l'infection mais leur fréquence d'apparition ne doit pas être élevée, du moins avec le matériel

utilisé, puisqu'aucune interaction mesurable n'est apparue sur les seize combinaisons essayées.

Les résultats du troisième essai nous indiquent la valeur d'un tel classement lorsque les souches se trouvent dans un environnement plus complexe et en présence de souches de *Rhizobium* de même spécificité et d'efficience comparable. Dans cet essai où chaque souche est apportée au moment du semis de la plante dans un sol qui contient déjà des *R. japonicum* et une microflore naturelle, cette souche entre d'abord en compétition avec les micro-organismes du sol pour sa survie, puis en compétition avec les *R. japonicum* pour la formation des nodosités. En mesurant le nombre de nodosités formées par la souche apportée par rapport au nombre de nodosités formées par la souche du sol, on a fait une mesure du phénomène global de compétition entre les deux souches. Or, dans ces conditions qui, sans être celles d'un champ se rapprochent des conditions naturelles, ce sont les souches qui ont le coefficient de compétitivité pour l'infection le plus élevé qui, en présence de la souche du sol, forment le pourcentage de nodosités le plus grand et qui sont le plus compétitives.

Il semble donc que dans les conditions de l'essai où ont pu s'exprimer compétence saprophytique et compétitivité pour l'infection, la compétitivité pour l'infection ait eu un rôle prépondérant, ce qui est en accord avec les résultats déjà trouvés pour d'autres groupes de *Rhizobium*.

La comparaison du pouvoir compétitif de souches de *R. japonicum* (Skrdleta et Karimova, 1969 ; Cadwell, 1969) nécessite de procéder à l'identification des nodosités, travail long qui ne permet de comparer qu'un nombre très limité de souches ; la mesure de la compétitivité pour l'infection réduite à une série de pesées permet de comparer un grand nombre de souches et donne donc la possibilité d'entreprendre une sélection de *R. japonicum* d'après ce caractère, qui, bien que ne pouvant être confondu avec le pouvoir compétitif global, y joue cependant un rôle majeur.

Une telle sélection trouve son application dans tous les cas. Soit dans le cas où le sol étant déjà pourvu de souches spécifiques de *Rhizobium* on désire faire former les nodosités par une souche d'efficience supérieure nécessitant la sélection de souches à compétitivité pour l'infection élevée pour supplanter les souches du sol (Etats-Unis pour le soja), soit lorsque le sol est dépourvu de *Rhizobium* d'une spécificité donnée (soja en France).

En effet, en introduisant une souche de *R. japonicum* dans ces sols on va les contaminer de manière irréversible. Il faut donc introduire une souche très efficace à fixer l'azote avec la plante hôte et si l'on veut ménager l'avenir, avenir dans lequel il n'est pas impossible que l'on trouve des souches plus fixatrices dans les conditions considérées, il est important que cette souche puisse être supplantée facilement par une autre. L'idéal serait une souche qui ne survive dans les sols que le temps de la culture ou de la rotation. En attendant d'avoir une telle souche, il serait donc judicieux d'introduire dans les sols français dépourvus de *R. japonicum* des souches à compétitivité pour l'infection la plus faible possible donc plus facilement supplantables ultérieurement.

Conclusion

Il a été possible dans cette étude de différencier des souches de *R. japonicum* sur leur compétitivité pour l'infection ou aptitude à être sélectionnées par la plante hôte

pour former les nodosités en présence de souches de même spécificité, et de montrer que les souches ayant une compétitivité pour l'infection la plus élevée étaient les souches qui avaient le pouvoir compétitif le plus grand lorsqu'elles étaient introduites dans un sol contenant déjà des *Rhizobium*.

La sélection sur la compétitivité pour l'infection sera donc importante à prendre en considération dans le cas des sols français où il semble plus prudent de n'introduire que des souches à compétitivité pour l'infection faible, donc plus facilement supplantables puisqu'ils sont naturellement dépourvus de *R. japonicum*.

Reçu pour publication en décembre 1976.

Remerciements

Ce travail a été effectué avec l'aide technique et financière du C.E.T.I.O.M. que nous tenons à remercier particulièrement.

Summary

Selection of Rhizobium japonicum *strains on their competitiveness for infection*

The competitiveness for infection or ability to form nodules in presence of other strains of 13 strains of *Rhizobium japonicum* was measured. This was done by comparison of the dry weight of soybeans inoculated with an effective strain to the dry weight of soybeans inoculated with a mixture of the effective strain with an ineffective one ; the strains were classified. Competitiveness for infection of four of these strains was compared to their competitive ability determined by the number of nodules they formed when they were introduced by seed inoculation into a soil containing *Rhizobium* of the same cross-inoculation group. Competitiveness for infection and overall competitiveness vary in the same way.

The necessity to undertake a selection on the competitive ability of *R. japonicum* is discussed.

Zusammenfassung

Züchtung von Rhizobium japonicum *Stämmen gemäss ihrer Konkurrenzfähigkeit bezüglich der Infektion*

Die Konkurrenzfähigkeit bei der Infektion oder die Fähigkeit, in Gegenwart anderer Stämme der selben Zugehörigkeit Knötchen bilden zu können, wurden an 13 *Rhizobium japonicum* Stämmen gemessen. Dafür wurde das Trockengewicht von Sojabohnen, die mit einem wirkenden Stamm beimpft worden waren mit dem Trockengewicht von Pflanzen verglichen, die mit einer Mischung aus dem selben wirkenden Stamm und einem unwirsamen Stamm beimpft waren. Somit konnte eine Einteilung der Stämme erfolgen.

Die Konkurrenfähigkeit bezgl. der Infektion von 4 Stämmen aus dieser Gruppe wurde mit deren Konkurrenzfähigkeit verglichen, die durch die Anzahl der gebildeten Knötchen bestimmt wird, die bei der Samenbeifügung in einem Boden mit *Rhizobium* der selben Zugehörigkeit entstehen. Die Konkurrenzfähigkeit begl. der Infektion und die globale Konkurrenzfähigkeit variieren gleichermassen. Die Notwendigkeit, eine Züchtung von *Rhizobium japonicum* zu betreiben je nach deren Konkurrenzfähigkeit bezgl. der Infektion steht zur Diskussion.

РЕЗЮМЕ

Селекция клонов *Rhizobium japonicum* по их компетитивности в отношении инфекции.

ЛАГАШЕРИ Б., ГЮГО Р., АМАРЖЕ Н.

На тринадцати клонах *Rhizobium japonicum* изучалась их компетитивность в отношении инфекции, и способность образовывать корневые узелки в присутствии других, таких-же специфичных клонов. Для этого сравнивался вес сухого вещества образованного соей, на

которой был приьит продуктивный клон, с сухим весом растений привитых с помощью смеси продуктивного клона с клоном непродуктивным. Это позволило классифицировать исследованные клоны. Компетитивность четырех таких клонов сравнивалась, кроме того, при прививке, с их компетитивной силой, определявшейся по количеству узелков образованных ими при их введении в семена, в почве снабженной клоном *Rhizobium* той-же специфичности : Компетитивность при инфекции и общая компетитивная сила изменяются в одном и том-же направлении.

Обсуждается необходимость селекции клонов *Rhizobium japonicum* на их компетитивность при инфекции.

Références bibliographiques

CALDWELL B. E., 1969. Initial competition of root-nodule bacteria on soybeans in a field environment. *Agron. J.*, **61,** 813-815.

CALDWELL, B. E., VEST G., 1968. Nodulation interaction between soybean genotypes and serogroups of *Rhizobium japonicum*. *Crop Sci.*, **8,** 680-682.

CHATEL D. L., GREENWOOD R. M., PARKER C. A., 1968. Saprophytic competence as an important character in the selection of *Rhizobium* for inoculation. *9th Int. Cong. Soil Sci. Trans.*, vol. II, 65-73.

DEMOLON A., DUNEZ A., 1939. Observations sur la culture du soja et l'inoculation des semences. *C. R. Ac. Agr.*, 361-368.

GIBSON A. H., 1963. Physical environment and symbiotic nitrogen fixation. The effect of root temperature on recently nodulated Trifolium subterraneum L. plants. *Aust. J. Biol. Sci.*, **16,** 28-42.

ISWARAN V., GRAHAM P. H., JAUHRI K. S., 1969. Modified Burton's medium for large scale production of culture of *Rhizobium japonicum*. *Curr. Sci.*, **38,** 346.

LAGACHERIE B., 1973. L'inoculation du soja. *Bul. CETIOM*, **53,** 6-11.

MEANS U. M., JOHNSON H. W., ERDMAN L. W., 1961. Competition between bacterial strains effecting nodulation in soybeans. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **25,** 105-108.

OBATON M., 1971. Utilisation de mutants spontanés résistants aux antibiotiques pour l'étude écologique des *Rhizobium*. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **272,** 2630-2633.

SKRDLETA V., KARIMOVA J., 1969. Competition between two somatic serotypes of *Rhizobium japonicum* used as double strain inocula in varying proportions. *Arch. Mikrobiol.*, **66,** 25-28.

VINCENT J. M., 1970. *A manual for the practical study of root nodule bacteria*, I.B.P. Handbook n° 15, p. 3. Blackwell Scientific Publications. Oxford and Edinburgh.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 391-407.

Relations entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité chez diverses variétés de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.)

J.-F. LEDENT *

avec la collaboration technique de Marie-Pierre LEDENT, Marie-France JOURET et Thérèse BELLEFONTAINE

Université Catholique de Louvain,
Laboratoire d'Ecologie végétale,
4, place Croix-du-Sud
B-1348 *Louvain-la-Neuve, Belgique*

Résumé

Une étude a été réalisée en plein champ, au sein d'une population de trois cultivars de blé d'hiver (Cama, Norda, Maris Nimrod), sur les relations entre le rendement par épi — plus particulièrement ses composantes (nombre d'épillets fertiles, nombre de grains par épillet, poids moyen d'un grain) et divers caractères morphologiques des parties aériennes de la plante. Des talles normalement développées, choisies au hasard, font l'objet des observations. La corrélation simple, la régression multiple usuelle, la régression progressive et l'analyse factorielle ont été utilisées comme méthode d'analyse. Les caractères morphologiques considérés portent essentiellement sur les poids secs, les dimensions (longueurs) des talles et de leurs organes (limbes foliaires, gaines foliaires, sections et tiges). Pour une année donnée, le rendement par épi dépend surtout du nombre de grains et plus précisément du nombre de grains par épillet. Le poids moyen d'un grain joue sous ce rapport un rôle moins important.

Les caractères morphologiques végétatifs (par opposition aux caractères de l'épi) les plus liés au rendement par épi sont : les poids secs totaux de la talle (sans l'épi) et de la dernière ou de l'avant-dernière gaine foliaire. Des épis lâches semblent plus favorables (liaison négative entre le rendement et le nombre d'épillets par unité de longueur du rachis). Le lien entre la gaine et le rendement s'explique par les relations entre la gaine et le nombre de grains, et non par le remplissage de ces derniers.

Introduction

Dans un champ de blé apparemment homogène, la taille et la constitution des épis peut varier d'une talle à l'autre, même si on ne tient compte que des talles bien développées.

Le but de cette étude est de déceler à quels caractères morphologiques de la talle est associé le rendement par épi. Elle s'inscrit dans le cadre des travaux consacrés aux relations entre caractères morphologiques et le rendement chez le blé (Simpson, 1968 ;

* Chargé de recherches FNRS. Une partie de cette étude fut effectuée alors que l'auteur disposait d'une bourse de recherches de l'IRSIA.

Hsu et Walton, 1971 ; Walton, 1972). Mais il ne s'agit pas ici de comparer des rendements en fonction de différences morphologiques variétales. Le propos est d'étudier séparément des ensembles de talles génétiquement homogènes (étude intravariétale).

Des travaux précédents (Ledent, 1974*a*, 1974*b*) avaient révélé des relations bien définies entre certains caractères morphologiques des gaines ou des limbes foliaires et le rendement par épi.

Il est bien connu que chacune des composantes du rendement par épi (nombre d'épillets, nombre de grains par épillet, poids moyen d'un grain) est déterminée à des époques différentes de la vie du végétal (Kempeneers, 1973).

Par conséquent, les caractères morphologiques liés aux composantes du rendement peuvent différer selon les composantes envisagées, et des liens peuvent apparaître lors de phases du développement sans relation directe avec le remplissage du grain. Nous avons dégagé ce point dans une étude précédente (Ledent, 1974*a*). Dans cette communication, nous étudions les relations telles qu'elles apparaissent à la maturité complète. Par la même occasion, nous nous efforçons de cerner l'importance relative de trois composantes déterminant le rendement par épi.

Matériel et méthodes

1. — *Matériel et disposition de l'essai*

Cette étude a été effectuée en plein champ durant l'année 1974-1975.

Trois cultivars ont fait l'objet des mesures : Cama (Station de sélection de Gembloux, Belgique), Norda (Station de sélection d'Heverlée, Belgique) et Maris Nimrod, cultivés à la Station de sélection d'Heverlée (Belgique) en plein champ, en sol sablo-limoneux.

La disposition de l'essai et les données culturales sont présentées au tableau 1.

TABLEAU 1

Données culturales

Dispositif expérimental	blocs aléatoires complets 4 répétitions
Dimension des parcelles	20 m × 2 m
Date de semis	8 novembre
Densité des semis	180 kg/ha
Fumure : N	110 kg/ha d'azote sous forme d'ammonitrate ; 20 au semis, 30 au tallage, début mars et 50 fin avril, début de montaison
P_2O_5	100 kg/ha (scories potassiques)
K_2O	240 kg/ha
Désherbage	MCPA et Neburon
Précédent	haricots

2. — *Caractères observés*

Lors de la maturité complète, on récolta des talles dans chacune des parcelles, en évitant les rangées latérales : 100 talles par variété ; 25 pour chacune des quatre répé-

titions. En fait, il reste 93 observations pour Cama et Maris Nimrod, et 83 pour Norda.

Les talles sont choisies au hasard, à partir de l'ensemble des talles bien développées de la population. Notre étude ne concerne donc que celles-ci. Les caractères indiqués au tableau 2 furent alors déterminés.

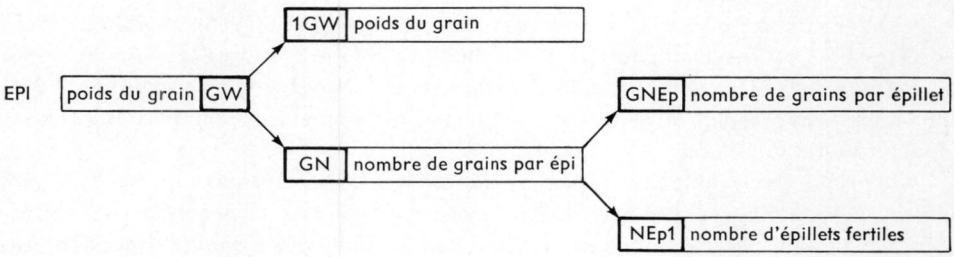
Les divers symboles et notations utilisés sont résumés dans le même tableau.

Tous les poids secs sont obtenus à la maturité complète, après séchage (48 h à 95°) en étuve ventillée, et refroidissement des échantillons en dessicateurs contenant du silicagel.

TABLEAU 2

Caractères étudiés et symboles

— rendement par épi et composantes

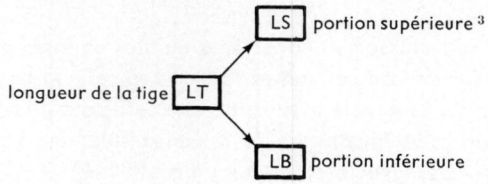


— poids de balles [1] BAL

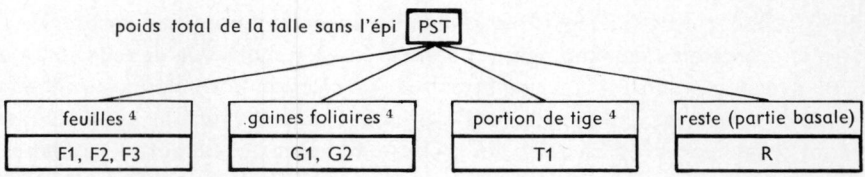
— longueur de l'épi LE ; NEp2 nombre d'épillets stériles ; ED densité des épillets [2]

FEUILLES ET TIGE (CARACTÈRES VÉGÉTATIFS)

a) longueurs (sans l'épi)



b) poids



[1] glumes, glumelles, rachis
[2] rapport NEp1/LE.
[3] au-dessus du dernier nœud.
[4] la numérotation est faite à partir du sommet.

3. — *Analyse statistique*

Le but essentiel poursuivi dans l'analyse des résultats obtenus est de classer les caractères étudiés selon leur lien avec le rendement par épi et ses composantes. A cet effet, on utilise classiquement les méthodes de corrélation et de régression linéaires. Afin de pouvoir étudier en une fois l'ensemble complexe des interrelations entre caractères, on a utilisé également l'analyse factorielle.

Chacune de ces méthodes a ses limitations. Aucune n'est parfaite. Souvent cependant, une partie au moins des résultats obtenus par ces quatre méthodes différentes convergent dans les grandes lignes. Cette partie des résultats peut donc être considérée comme relativement sûre ; c'est à elle que nous nous attacherons dans cette communication.

3.1. — *Description des méthodes statistiques utilisées. Justification de leur emploi.*

Le lecteur se référera aux ouvrages statistiques de Seal (1966), Morrison (1967) et Dagnélie (1975) pour l'analyse factorielle. Il se référera à Draper et Smith (1966) et à Dagnélie (1975) pour les autres méthodes. De leur côté, Hsu et Walton (1971) ont également présenté les différentes méthodes, mais en les plaçant dans un contexte concret tout à fait identique au nôtre.

Bien que les techniques utilisées soient différentes — au moins en partie — des nôtres, le lecteur consultera également Conesa *et al.* (1976) avec profit. Dans les paragraphes suivants, nous présentons la motivation qui fut la nôtre dans le choix des techniques d'analyse statistique.

Nous avons utilisé tout au long de ce texte la terminologie française présentée par Dagnélie (1975).

Notre choix et sa motivation sont des plus classiques. Ils correspondent dans les grandes lignes à ceux de Hsu et Walton (1971) ; ils découlent directement de caractéristiques bien connues des méthodes usuelles disponibles, décrites par les divers auteurs cités ci-dessus. Pour la facilité du lecteur, nous avons esquissé brièvement ci-dessous le cheminement suivi.

3.11. Au premier stade, on cherche à classer les caractères étudiés en fonction de l'intensité de leur relation avec le rendement ou ses composantes. On calcule donc la matrice des corrélations, et on classe d'après la valeur absolue du coefficient de corrélation simple avec le rendement. A ce stade, vu la complexité de l'ensemble, un examen global des autres relations entre paires de caractères est souvent difficile.

3.12. Par les méthodes de régression multiples usuelles, on peut effectuer un pas supplémentaire en tenant compte de l'existence d'interrelations complexes entre variables ; ces dernières peuvent fausser le sens des corrélations simples observées. On classera les caractères morphologiques d'après la valeur absolue de leur corrélation partielle avec le rendement. Les coefficients de corrélation partielle mesurent en effet l'intensité de la relation entre la variable expliquée et une des variables explicatives, en éliminant l'effet des autres. En outre, les coefficients de régression partielle obtenus par les mêmes méthodes permettent également une classification d'après l'importance (pente) des relations.

La régression multiple usuelle présente cependant des limitations (voir les références citées plus haut). Pour les restreindre, il importe de limiter le nombre de

variables explicatives entrant dans l'équation de régression. Selon Dagnélie (1976), il est généralement inutile d'introduire plus de trois ou quatre variables explicatives. Comme les études précédentes ont montré l'importance plus grande des poids secs des parties sommitales, on a choisi ces caractères-là. Le choix présente cependant un côté arbitraire.

3.13. La troisième méthode utilisée, la régression pas à pas (dite encore régression progressive), présente un caractère moins arbitraire puisque la sélection des variables s'effectue selon un processus raisonné. A chaque palier de l'analyse, les variables précédemment sélectionnées, devenues non significatives, sont éliminées et on introduit dans le modèle la variable la plus explicative parmi les autres. Comme dans le cas précédent, on peut se servir de l'équation de régression multiple obtenue. On peut également classer les variables d'après leur ordre de sélection dans l'équation.

3.14. Afin de ne pas être limité aux quelques variables explicatives des équations de régression, on peut enfin utiliser l'analyse factorielle. Cette méthode permet d'aborder en bloc l'ensemble des relations exprimées dans la matrice des corrélations. On remplace la matrice des corrélations par une structure équivalente, mais de forme plus accessible. Ainsi, à partir de l'ensemble des variables observées, corrélées entre elles, on extrait une série plus limitée de variables théoriques indépendantes les unes des autres. Ce sont les facteurs communs qui représentent des directions privilégiées de l'ensemble. Le lien entre facteurs et variables observées s'exprime par des coefficients appelés saturations. Un facteur doté d'une saturation élevée pour le rendement peut être considéré comme un facteur rendement. A ce moment, on peut classer les caractères étudiés d'après la valeur absolue de leur saturation dans les facteurs de rendement. Au point de vue méthodologique, notons qu'il existe diverses méthodes de calcul des saturations. Nous avons utilisé l'une des plus simples, celle des facteurs principaux (terminologie de Dagnélie, 1975).

Malgré ses qualités évidentes pour l'étude de ce genre de problèmes (voir Hsu et Walton, 1971), l'analyse factorielle présente aussi des limitations (Seal, 1966). C'est pourquoi nous avons utilisé conjointement les différentes méthodes.

3.2. — *Remarques.*

Bien que les facteurs obtenus par l'analyse factorielle aient été soumis à des rotations, nous ne discuterons que les résultats obtenus sans celle-ci. L'emploi des rotations sur ces données ne s'est pas en effet avéré utile pour l'interprétation des facteurs.

Les caractères inclus comme variable explicative dans la régression multiple sont indiqués au tableau 5. Chacune des composantes du rendement devient à son tour la variable à expliquer. Nous avons calculé trois séries de régressions progressives ; elles sont décrites ci-après.

Toutes les analyses étant essentiellement intravariétales, les résultats sont donc présentés par variété (cultivar).

La question du comportement propre des divers cultivars utilisés peut néanmoins se poser. Il est assez difficile de tester statistiquement la similitude de ce genre de résultats (analyse factorielle, matrice de corrélations) pour diverses variétés. Cet aspect n'est donc pas abordé ici.

On se contentera de souligner les tendances communes aux divers cas envisagés.

Toutefois, les différences les plus marquantes seront notées ; mais on se défendra d'y attacher une trop grande importance car la signification de ces différences n'a pas été statistiquement vérifiée. Dans l'ensemble, on notera d'ailleurs que les cultivars semblent très peu différer les uns des autres.

Résultats

1. — *Coefficient de variation des caractères morphologiques et valeurs moyennes des composantes du rendement par épi*

Comme la variabilité des caractères étudiés présente peu de différences, on a regroupé les résultats relatifs aux divers cultivars.

Les caractères morphologiques ont été classés en 5 catégories, suivant les valeurs du coefficient de variation (CV p. 100 $= \sigma/\overline{X}$).

1. 6-10 p. 100 : LT, DE.
2. 11-15 p. 100 : NEp1, LE, LB.
3. 15-20 p. 100 : GNEP, 1GW, LS.
4. 21-30 p. 100 : la plupart des poids secs : E, G1, T1, F2, F3, G2, R, GW, PST, ainsi que GN.
5. Au-delà de 30 p. 100 (en fait au-delà de 50 p. 100) : NEp2 et BAL.

Les valeurs moyennes des composantes du rendement sont présentées au tableau 3.

TABLEAU 3

Composantes du rendement par épi (1)

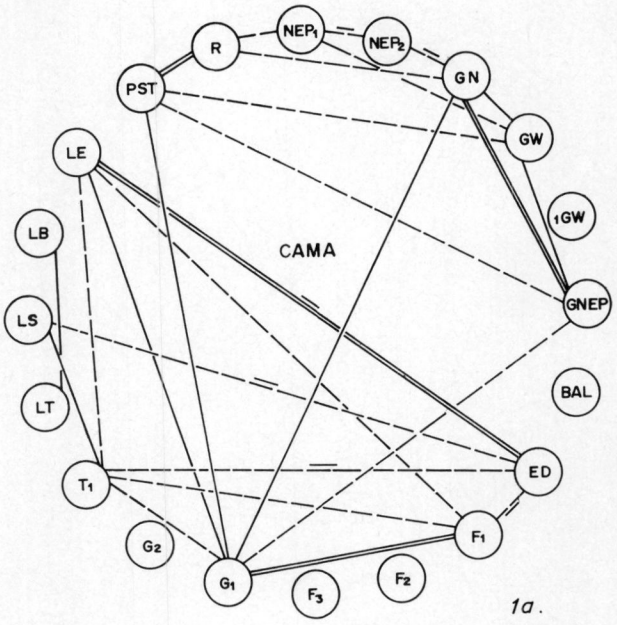
Composante	Cama	Maris Nimrod	Norda
GW (mg)	2 085	2 092	1 720
1 GW (mg)	42,9	43,9	39,7
GNEP	2,6	2,6	2,3
NEp1	18,7	18,1	18,6

(1) Voir les symboles, tableau 2.

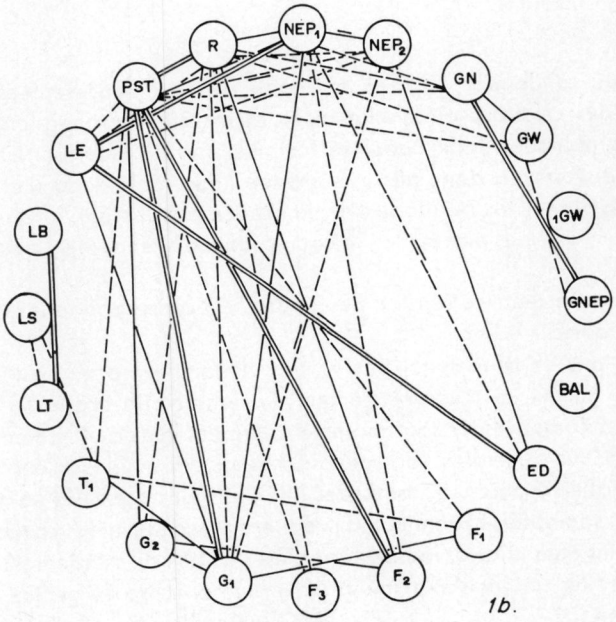
2. — *Corrélation simple*

L'examen des matrices de corrélation révèle que la plupart des caractères étudiés sont liés significativement ($p = 0{,}05$ ou même $p = 0{,}01$) entre eux. Par conséquent, les graphes de corrélation avec lesquels on schématise ces relations sont très chargés et très confus (fig. 1*a*, 1*b*, 1*c*). C'est une caractéristique de ce genre d'études (Ledent, 1974). Pour éviter de rendre les graphes illisibles, nous avons représenté uniquement les liaisons correspondant à des coefficients de corrélation supérieurs en valeur absolue à 0,6 (ce choix est arbitraire). Dans le cas du cultivar Norda, nous avons été obligés de réduire la représentation aux coefficients à 0,7.

Toutefois, les corrélations situées entre 0,6 et 0,7, et impliquant au moins une des



1a.



1b.

MARIS NIMROD

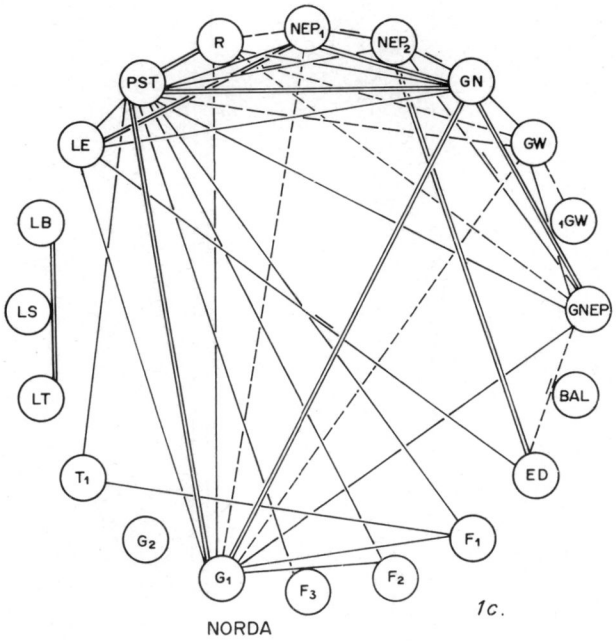


FIG. 1. — *Graphe de corrélations. Relations correspondant à* $|r| \geqslant 0.8$ = ; $0.8 > |r| \leqslant 0.7$ — ; $0.7 < |r| \leqslant 0.6$ - - - (Remarque : r est le coefficient de corrélation. Pour les symboles voir tableau 2).

composantes du rendement par épi, ont également été représentées. La complexité et le nombre des relations auxquelles nous avons affaire soulignent la nécessité de méthodes plus poussées, telle l'analyse factorielle (voir plus haut).

Nous ne discuterons donc pas à ce niveau l'ensemble de la matrice ; nous nous contenterons d'étudier les relations avec le rendement par épi, ainsi que les relations avec le nombre de grains par épillet, la composante du rendement qui se révèle la plus importante.

La partie de la matrice (en fait deux rangées) correspondant à ces relations est présentée au tableau 4.

Les variations de rendement par épi proviennent en premier lieu de variations du nombre de grains, et plus précisément du nombre de grains fertiles par épillet. Les deux autres composantes sont moins étroitement liées au rendement. Les liaisons avec les caractères végétatifs sont plus lâches que prévu. Des caractères liés à la vigueur de la talle (le poids sec total sans l'épi, le poids sec de la partie basale) et les gaines foliaires sommitales prennent la première place parmi les caractères végétatifs. Parmi les feuilles sommitales, la dernière n'est pas liée au rendement. La relation du rendement avec les gaines s'exprime à travers le nombre de grains, et non le poids moyen par grain.

Les relations entre rendement et longueur totale sont peu marquées : une talle vigoureuse n'est pas particulièrement longue.

TABLEAU 4

Coefficients de corrélation à la maturité (1)

	GN			GNEp		
	Cama	Maris Nimrod	Norda	Cama	Maris Nimrod	Norda
Rendement par épi et composantes						
GW	—	—	—	0,750 (2)	0,674 (2)	0,731 (3)
GN	0,798 (1)	0,777 (1)	0,786 (1)	0,921 (1)	0,906 (1)	0,889 (1)
GNEp	0,750 (2)	0,675 (2)	0,731 (2)	—	—	—
NEp1	0,612 (4)	0,554 (5)	0,591 (7)	0,505 (6)	0,308 (8)	0,456 (14)
NEp2	— 0,451 (9)	— 0,459 (9)	— 0,517 (12)	— 0,493 (7)	— 0,457 (3)	— 0,715 (4)
1 GW	0,531 (6)	0,444 (10)	0,642 (4)			
Caractères végétatifs						
PST	0,622 (3)	0,601 (4)	0,667 (3)	0,699 (3)	0,347 (6)	0,738 (2)
R	0,536 (5)	0,606 (3)	0,604 (6)	0,529 (5)	0,374 (5)	0,692 (6)
G1	0,524 (7)	0,533 (7)	0,640 (5)	0,665 (4)	0,327 (7)	0,700 (5)
G2	0,350 (11)	0,536 (6)	0,577 (8)	0,386 (12)	0,300 (9)	0,548 (10)
F3	— 0,452 (8)	0,235 (14)	0,477 (14)	0,275 (14)		0,436 (15)
F2	0,430 (10)	0,430 (11)	0,526 (10)	0,446 (8)	0,212 (12)	0,554 (9)
F1	0,289 (14)	0,210 (15)	0,479 (13)	0,368 (13)		0,481 (12)
T1	0,226 (15)	0,321 (13)	0,519 (11)	0,440 (9)		0,576 (8)
LS					— 0,236 (11)	
LT				— 0,209 (16)		
Caractères de l'épi						
LE	0,291 (12)	0,497 (8)	0,560 (9)	0,410 (11)	0,298 (10)	0,465 (13)
ED		— 0,400 (12)	— 0,470 (15)	— 0,225 (15)	— 0,419 (4)	— 0,643 (7)
BAL			0,326 (16)	0,424 (10)		0,528 (11)

(1) Seuls les coefficients significatifs au niveau $p = 0,05$ sont présentés (pour $p = 0,05$, il faut $|r| \geqslant 0,202$ et pour $p = 0,01$ il faut $|r| \geqslant 0,264$). Voir les symboles au tableau 2. Les chiffres entre parenthèses correspondent au classement des coefficients de corrélation d'après leur valeur absolue, dans chaque colonne. Les caractères n'apparaissant pas dans ce tableau ne sont liés significativement ni au rendement par épi (GN) ni au nombre de grains par épillet (GNEp).

3. — *Régressions multiples et corrélations particulières*

Le rendement par épi apparaît plus lié au développement (poids sec) des parties sommitales (gaines, limbes, portions de tiges situées au-dessus du dernier nœud) qu'à celui des trois dernières feuilles.

Parmi les parties sommitales, la gaine vient manifestement en tête (tabl. 5) ; parmi les feuilles, la dernière est loin de dominer.

Ce sont les composantes relatives au nombre de grains qui sont liées aux caractères morphologiques : un examen détaillé le confirme une fois de plus.

Ceux-ci ne sont pas associés au remplissage du grain.

Parmi l'ensemble des caractères végétatifs étudiés, la dernière gaine semble à nouveau jouer le rôle marquant. La considération des coefficients de régression et de corrélation partielle mène à des conclusions similaires.

TABLEAU 5

Régressions multiples entre les composantes par épi et les poids secs des diverses parties de la taille (1)

Variable expliquée	Variété	Corrélation partielle					Régression partielle (2)				Corrélation multiple
		Variables explicatives									
		G1	T1	F1	F2	F3	G1	F1	F2	F3	R
GN	Cama	0,366 **	— 0,004	— 0,202	0,164	0,233 **	8,327			7,862	0,651
	MN (3)	0,492 **	— 0,050	— 0,407 **	0,147	0,036	13.101	— 12,743			0,643
NEp1	Cama	0,432 **	— 0,181	— 0,056	— 0,182	0,346 **	37,900			41,970	0,696
	MN	0,580 **	— 0,107	— 0,321 **	0,213 *	0,145	44,060	— 25,780	19,730		0,803
1GW	Cama	— 0,142	0,033	0,034	0,108	0,169					0,284
	MN	— 0,067	0,100	— 0,040	0,088	— 0,072					0,018
GNEp	Cama	0,565 **	0,099	— 0,412 **	0,268 **	— 0,035	9,539	— 7,349	4,652		0,758
	MN	0,400 **	— 0,138	— 0,284 **	0,014	— 0,034	10,040	— 8,383			0,210

(1) Voir les symboles du tableau 2.
(2) Seuls les coefficients de régression partielle qui sont significativement différents de zéro ($p = 0,05$) sont présentés. Les poids secs à partir desquels ces calculs ont été effectués sont exprimés en grammes.
(3) M.N. = Maris Nimrod.

4. — *Régression pas à pas*

On a calculé successivement trois régressions progressives, avec le rendement par épi comme variable à expliquer (tabl. 6). Pour l'équation 1, les variables explicatives possibles sont les suivantes : poids sec des deux dernières gaines (G1 et G2), des trois dernières feuilles (F1, F2, F3), longueurto tale (sans l'épi : LT) et poids sec de la talle (sans l'épi : PST).

TABLEAU 6

Ordre d'inclusion de différents caractères dans l'équation de régression pas à pas, avec le rendement par épi comme variable dépendante ; signe de leur coefficient de régression dans l'équation finale et coefficient de corrélation multiple correspondant (R) (1)

1) Régression sur les caractères végétatifs					
Cama	PST (+)	LT (−)			R = 0,669 **
Maris Nimrod	PST (+)	F1 (−)	G1 (+)		R = 0,674 **
Norda	PST (+)	G2 (+)			R = 0,690 **
2) Régression sur les caractères de l'épi (2)					
Cama	GNEP (+)	1GW (+)	NEp1 (+)		R = 0,989 **
Maris Nimrod	GNEP (+)	1GW (+)	NEp1 (+)		R = 0,975 **
Norda	GNEP (+)	1GW (+)	NEp1 (+)	ED (+)	R = 0,969 **

(1) Voir les symboles du tableau 2.
(2) Les régressions sur l'ensemble des caractères végétatifs et de l'épi donnent des résultats identiques à ceux des régressions sur les caractères de l'épi.

Pour l'équation 2, comme variables explicatives possibles, on a les caractères de l'épi : nombre d'épillets fertiles (NEp1) et stériles (NEp2), les composantes 1 GW (poids moyen d'un grain) et nombre de grains par épillet (GNEp). Pour l'équation 3, il s'agit de l'ensemble des variables citées pour les deux ensembles précédents. Les équations de type 1 ont également été calculées avec les composantes du rendement comme variables à expliquer.

Le but de ce découpage est d'étudier séparément les relations entre rendement par épi et caractères végétatifs d'une part (éq. 1), et les relations entre le rendement par épi et ses composantes d'autre part (type 2). En effet, dans ce genre d'études (Hsu et Walton, 1971 ; Ledent, 1974), la liaison entre le rendement par épi et ses composantes est telle que les composantes sont presque toujours sélectionnées les premières par le processus de régression progressive ; une fois celles-ci intégrées dans l'équation, l'insertion des autres variables ne permet plus de progression significative et le processus est stoppé.

C'est d'ailleurs ce que nous observons ici (éq. 3).

C'est pourquoi, seuls les résultats relatifs aux régressions des types 1 et 2 ont été reportés.

D'autre part, au niveau de la prédiction des rendements par exemple, il est bon de se rappeler que l'observation des caractères de l'épi n'est réalisable qu'après l'épiaison, voire même nettement après la floraison (nombre de grains). La plupart des caractères végétatifs pourraient en principe être observés bien plus tôt. Finalement, composantes du rendement d'une part, et caractères végétatifs d'autre part, forment chacun un groupe suffisamment distinct pour qu'on étudie séparément leur relation avec le rendement.

Le tableau 6 montre le rôle prépondérant du poids sec total parmi les caractères végétatifs : il vient toujours en première position dans les équations de type 1. Les gaines foliaires (G1 ou G2) exercent aussi un effet important pour deux variétés sur trois. Les régressions sur les caractères de l'épi nuancent les conclusions tirées des corrélations simples. La composante du rendement la plus importante reste toujours le nombre de grains par épillet. Le poids moyen du grain se situe en seconde position, avant le nombre d'épillets fertiles, et non plus en troisième position.

En ce qui concerne le poids moyen du grain, les liens avec les caractères végétatifs sont très médiocres. Le poids moyen par grain dépend essentiellement des conditions qui prévalent au cours du remplissage et de la maturation. Les régressions avec GNEp (nombre de grains par épillet fertile) ou NEp1 (nombre d'épillets fertiles) comme variables dépendantes donnent des résultats assez semblables aux régressions avec le rendement par épi comme variable dépendante ; aussi ne sont-ils pas repris.

5. — *Analyse factorielle*

On trouvera au tableau 7 les saturations du rendement par épi, de ses composantes et d'un des caractères végétatifs le plus étroitement liés au rendement (le poids sec total sans l'épi, PST).

Dans chaque cas (tabl. 7), un et un seul facteur peut se distinguer, comme un facteur rendement par épi (GW). Le caractère poids du grain par épi présente une saturation élevée dans ce facteur, et une saturation plus faible dans les autres facteurs. Chaque fois, il s'agit du premier facteur : ceci indique le lien de l'ensemble des caractères morphologiques avec le rendement par épi. La proportion de la variante totale expliquée par le facteur rendement est de : 0,388, 0,455 et 0,533 pour Cama, Maris Nimrod et Norda, respectivement. Chez les trois variétés, le nombre d'épillets fertiles et le nombre de grains par épillet se révèlent nettement liés au rendement (saturation beaucoup plus élevée pour ces caractères, dans le premier facteur, par rapport aux autres). Le poids moyen par grain, par contre, apparaît plus lié à un autre facteur — le quatrième pour Cama et Maris Nimrod, le troisième pour Norda — on peut considérer ce dernier comme le facteur « poids moyen du grain ». Par conséquent, celui-ci n'est pas déterminé de la même façon que les autres composantes du rendement.

On trouvera la représentation graphique des saturations dans le plan défini par les deux premiers facteurs, à la figure 2.

Le facteur rendement (premier facteur) correspond à l'abscisse.

De l'examen des graphiques, et plus particulièrement de l'examen du facteur rendement par épi chez les trois variétés, on tire les conclusions suivantes (fig. 2) :

Le classement des divers caractères d'après leur lien avec le rendement (valeur absolue de leur saturation dans le facteur rendement) donne aux trois premières places le poids sec total (sans l'épi), le poids sec de la première gaine et le nombre de grains.

TABLEAU 7

Saturation du caractère rendement par épi et de ses composantes dans les 4 premiers facteurs issus de la factorisation de la matrice des coefficients de corrélation (1)

Facteur	1	2	3	4
Cama				
GW	0,747	— 0,366	— 0,348	— 0,366
GN	0,930	— 0,187	— 0,047	0,125
GNEp	0,832	— 0,108	— 0,238	0,174
NEp1	0,780	— 0,213	0,269	— 0,045
1GW	— 0,057	— 0,349	— 0,474	— 0,637
PST	0,909	— 0,146	0,108	— 0,100
Maris Nimrod				
GW	0,679	— 0,357	— 0,479	0,411
GN	0,768	— 0,406	— 0,354	— 0,133
GNEp	0,985	— 0,527	— 0,481	— 0,126
NEp1	0,887	— 0,040	0,069	— 0,143
1GW	— 0,039	0,067	— 0,265	0,722
PST	0,938	0,156	— 0,031	0,137
Norda				
GW	0,771	— 0,236	0,438	— 0,385
GN	0,937	— 0,016	— 0,012	— 0,076
GNEp	0,799	— 0,015	0,089	— 0,153
NEp1	0,813	— 0,006	— 0,146	0,066
1GW	0,117	— 0,332	0,681	— 0,492
PST	0,799	— 0,015	0,089	— 0,153

(1) Voir les symboles au tableau 2. A titre documentaire, on a également présenté les saturations correspondant à PST (poids sec total).

Chez Norda cependant, au lieu du nombre de grains apparaît le nombre d'épillets fertiles.

En ce qui concerne les différentes composantes du rendement, le poids moyen du grain ne se révèle pas déterminant. Cependant, et contrairement aux observations des autres méthodes, l'importance du nombre de grains par épillet et d'épillets fertiles paraît assez équivalente.

Sans s'attarder à une analyse plus détaillée de ces facteurs, on se contentera de souligner la liaison négative entre le nombre d'épillets par unité de longueur d'épi et le facteur rendement (saturation négative). Les épis plus lâches seraient de ce fait avantagés.

Discussion et conclusions

1) Dans l'ensemble, les quatre méthodes utilisées mènent à des conclusions convergentes, dans les grandes lignes. En outre, les cultivars examinés donnent sensiblement les mêmes résultats.

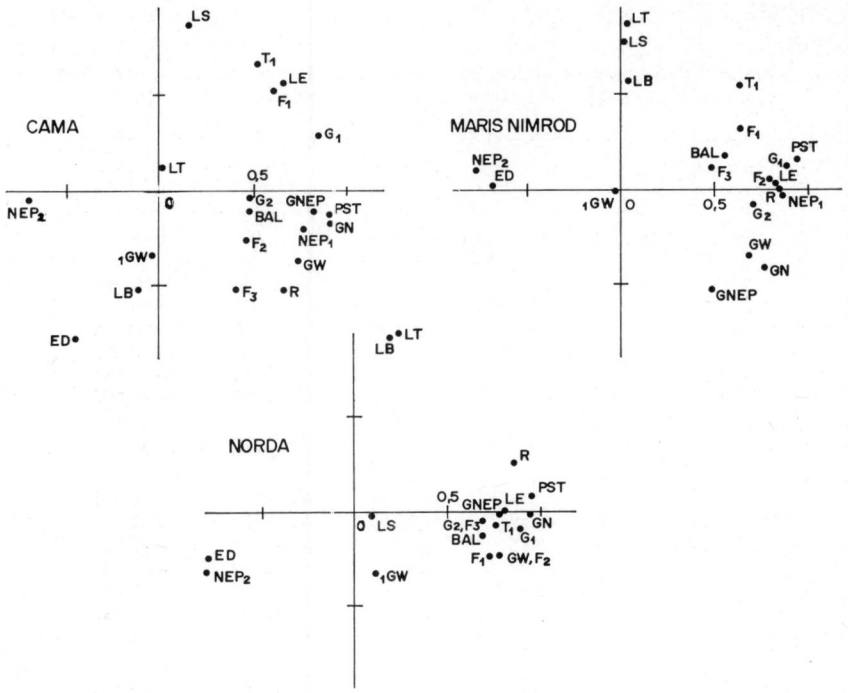


FIG. 2. — *Représentation des saturations des caractères morphologiques dans le plan formé par les deux premiers facteurs extraits de la matrice de corrélations.* Les saturations relatives au premier facteur (qui s'avère être le facteur rendement) sont portées en abscisse. Pour les symboles voir tableau 2. Seuls les caractères morphologiques correspondant à des saturations $\geqslant 0.4$ (en valeur absolue) dans le facteur rendement sont présentées.

A l'intérieur d'un champ homogène, une année donnée, les différences de rendement par épi sont dues surtout à des variations dans le nombre de grains. Ceci confirme nos observations précédentes (Ledent, 1971*b*). Les nombres de grains par épillet sont responsables de ces variations, plus que le nombre d'épillets fertiles.

2) Pour un cultivar donné, et pour une année donnée, le poids du grain par épi dépend des caractères morphologiques de la talle au travers des caractéristiques de l'épi telles que le nombre de grains ou le nombre d'épillets. La liaison entre le poids moyen du grain et la morphologie de la talle est faible.

3) L'influence de la morphologie de la talle se manifeste surtout par sa vigueur (poids sec total sans l'épi ; poids sec de la partie basale) et par le développement des gaines foliaires sommitales.

4) Le remplissage du grain et l'importance des surfaces foliaires des dernières feuilles ne paraissent pas jouer un rôle considérable dans la différenciation du rendement d'une talle à l'autre (dans un champ donné, pour une année donnée).

5) La période qui s'étend de la détermination du nombre d'épillets — assez tôt, lors de la différenciation de l'apex — jusqu'à quelques jours après la floraison, semble décisive. A ce moment l'épi est formé et le nombre de grains déterminé en grande partie. On n'insistera jamais assez sur l'importance de cette période qui correspond, en partie au moins, à la montaison. Les exigences de la plante (en eau, en azote) durant

cette période doivent absolument être satisfaites ; c'est un phénomène bien connu.

Dans les études physiologiques, on a malheureusement quelque peu négligé cette période de développement de l'épi, au profit du remplissage du grain. Les relations entre surfaces assimilatrices et épi sont moins bien connues.

6) La période de formation de l'épi précédant en grande partie le déploiement de la dernière feuille, il est assez logique que les deuxième ou troisième feuilles (à partir du sommet) apparaissent autant ou plus liées au rendement que les premières feuilles.

Il est vraisemblable que ces surfaces photosynthétiques soient alors les principaux fournisseurs d'assimilats au jeune épi en développement. Le rôle des gaines est plus difficile à expliquer. C'est un problème que nous avons déjà abordé ailleurs (Ledent, 1974). Le lien entre épi et gaines pourrait n'être qu'indirect. Si ces organes se développent en même temps, ils sont soumis aux mêmes aléas, d'où la relation entre leur développement. Le même type de relation pourrait d'ailleurs expliquer les relations étroites entre rendement et poids sec total de la talle (sans l'épi). En effet, le poids sec total est déterminé en grande partie lors de la montaison. Les gaines pourraient également jouer un rôle de protection, car elles entourent le jeune épi en développement. En outre, les gaines peuvent servir de réservoirs temporaires d'assimilation au moment de la formation de l'épi et plus tard. Il est clair qu'une étude comme la nôtre ne permet pas d'aller plus loin.

Quoi qu'il en soit, un des résultats les plus marquants de notre travail est de souligner l'importance de cette période de développement de l'épi. Cette importance se traduit essentiellement par l'influence de cette phase sur le nombre de grains, la composante du rendement par épi qui s'avère la plus importante.

7) Le fait de ne pas distinguer talles primaires ou secondaires ne semble pas devoir influencer ce genre de résultats (Ledent, 1974*b*). Il en va de même pour l'absence de mesure des surfaces foliaires avant leur flétrissement. La seule considération des poids secs à la maturité suffit (Ledent, 1974*a*). Le nombre de talles par m^2 n'a pas été pris en considération. En effet, des études précédentes (Ledent, 1974*b*) ont montré qu'on obtenait le même type de résultats à des densités très diverses (tant que le champ est homogène). Finalement, l'absence de différences variétales importantes et la similitude des résultats présentés ici avec ceux obtenus précédemment, dans des conditions parfois très différentes, semblent conférer une certaine généralité à nos conclusions.

L'ensemble des résultats relatés vaut pour le cas bien précis des variations intervariétales du blé d'hiver une année écoulée, cela va de soi. Il serait téméraire d'extrapoler ces conclusions et de les étendre à des comparaisons intervariétales ou à des comparaisons entre années. En outre, le type de relations observé dans une collection de cultivars entre rendement par parcelle et morphologie moyenne de chaque cultivar, n'est pas nécessairement le même que celui décrit ici. Il n'y a pas de compétition entre les cultivars alors qu'il y a concurrence entre talles au sein d'une même parcelle. Ces relations de compétition peuvent avoir un effet important sur le type de lien morphologie-rendement par épi. La morphologie de la talle la plus favorisée en cas de compétition n'est pas nécessairement celle du cultivar idéal, ainsi que l'a bien montré Donald (1968).

Une étude intervariétale a été menée parallèlement aux recherches présentées ; ses résultats sont relatés ailleurs (Ledent, 1977).

Reçu pour publication en juillet 1977.

Summary

Relationships at maturity between culm yield and morphological characters within cultivars of winter wheat

Relationships at maturity between culm yield or more exactly its components (number of fertile spikelets, number of kernels per spikelet, mean dry weight of one kernel) are studied within populations of the three following winter wheat cultivars, Cama, Maris Nimrod, Norda, grown in the field. Results are analysed with simple correlation, multiple regression, stepwise regression and factor analysis. The morphological characters considered are the dry weight and size (length) of the culm and its parts (leaf laminae, leaf sheaths, stem sections). Culm yield is basically determined by the number of kernels, which in turn is determined by the number of kernels per spikelet, or by the number of spikelets. The mean weight of one kernel plays a lesser role. Morphological characters are not closely related to that latter character. Among the vegetative characters (by opposition to ear characters) most closely related to yield are culm dry weight (without ear) and sheath of first uppermost or second leaf.

Loose spikelets seem more favourable (negative relationships between yield and number of spikelets per unit length of rachis). The close relationship between sheath and yield is explained by the relationship between sheath and grain number and not by grain filling.

Zusammenfassung

Beziehungen zwischen Ahrenertrag und morphologischen Kennzeichen im Reifezustand bei verschiedenen Winterweizen (Triticum aestivum *L.*)

Ein Freilandversuch an drei Feldern verschiedener Winterweizen (Cama, Norda, Maris Nimrod) wurde zur Erforschung der Beziehungen zwischen dem Ahrenertrag oder genauer seiner Bestandteile (Anzahl der fruchtbaren Grannen, Kornanzahl pro Granne, Durchschnittsgewicht eines Korns) und der morphologischen Kennzeichen der oberen Pflanzenteile druchgeführt. Normal entwickelte Schösslinge, die willkürlich ausgesucht wurden, dienten der Beobachtung.

Die einfache Korrelation, die gewöhnlich mehrfache Regression, die progressive Regression und die faktorielle Analyse wurden als Untersuchungsmethoden angewandt. Die in Betracht gezogenen morphologischen Kennzeichen betreffen hauptsächlich das Trockengewicht, die Längenmasse der Triebe und die Dimensionen ihrer Organe (Blattspreiten, Blattscheiden, Abschnitte und Halme).

Bei einem beliebigen Jahr hängt der Ahrenertrag vor allem von der Kornzahl ab, genauer gesagt von der Kornzahl pro Granne. Das Durchschnittsgewicht eines Korns spielt in dieser Beziehung eine weniger wichtige Rolle. Die morphologischen Vegetationskenzeichen (im Gegensatz zu den Eigenschaften der Ähre), die den Ertrag am stärksten beeinflussen, sind das gesamte Trockengewicht der Halme ohne Ähre und der letzen oder vor letzen Blatts cheiden.

Lackere Ähren sind anscheinend günstiger (negative Beziehung zwischen Ertrag und der Grannenzahl pro Ährenachse). Die Verbindung zwischen Blattscheide und Ertrag ist auf Grund der Beziehungen zwischen Blattscheide und Kornanzahl und nicht deren Fülle erklärbaf.

РЕЗЮМЕ

Соотношение между продуктивностью колоса и морфологическими характерностями разных сортов озимой пшеницы (*Triticum aestivum L.*).

ЛЕДАН Ж. Ф.

В полевых условиях, внутри популяции состоявшей из трех сортов (культиваров) озимой пшеницы (Кама, Норда и Марис Нимрод), изучалось соотношение между продуктивностью, колоса и, в частности, его составных (число плодородных колосков, число зерен в колоске, средний вес зерна), и различными морфологическими характерностями надземных частей растения. Велись наблюдения над случайно выбранными, нормально развитыми побегами. В качестве методов анализа применялись простая корреляция, обычная сложная регрессия, прогрессивная регрессия и факториальный анализ. Рассматривавшиеся морфологические

характерности относились главным образом к весу сухого вещества, размерам (длинне) побегов и их разных органов (листовая пластинка, листовое влагалише, срезы стебля). Продуктивность колоса зависела каждый год, в особенности, от числа находившихся в нем зерен, или, точнее, от количества зерен в колоске. Средний вес зерен играл в этом отношении менее важную роль.

Общий вес сухого вещества побега (без колоса) и последнего, или предпоследнего листового влагалища представляют морфологическне характерности (в противовес характерностям колоса), особенно связанные с продуктивностью колоса. Колос малой плотности представляется лучшим (отрицательная связь между продуктивностью и числом колосков на единицу длинны стержня). Существование связи между влагалищем листовым и продуктивностью об'ясняется соотношением которое существует между ним и количеством зерен в колосе, а не заполнением этих последних.

Références bibliographiques

CONEZA A. P., CAZES P., TOMASONNE R., BAILLON P., HADJ-MILOUD D., MAGINIEAU C., LEMAIRE P., 1976. Etude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut Chéliff. II. *Ann. agron.*, **27** (1), 61-84.

DAGNELIE P., 1975. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Presses agronomiques de Gembloux, 362 p.

DONALD C. M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, **17**, 385-403.

DRAPER N. R., SMITH H., 1966. *Applied regression analysis*. J. Wiley and Sons, New York, 407 p.

HSU P., WALTON P. D., 1971. Relationships between yield and its components and structure above the flag leaf node in spring wheat. *Crop. Sci.*, **11**, 190-193.

KEMPENEERS L., 1975. Est-il possible d'obtenir des rendements de 10 t à l'ha. *Revue de l'agriculture*, **28** (4), 845-868.

LEDENT J.-F., 1974*a*. Contribution à l'étude des relations entre l'épi et les parties sommitales de la plante chez le froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.). *Revue de l'agriculture* **27** (6), 1407-1420.

— 1974*b*. *Plant geometry, canopy architecture and leaf angle in wheat*. Ph. D. thesis. University of Minnesota. St-Paul, 327 p. Univ. microfilms. *Ann. Arbor.*, Mich. (Diss. Abstr. 74 : 17).

— 1977. Relationships between culm yield and morphological characters in winter wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Cereal Res. Commun.*, **5** (2), 89-99.

MORRISON D. F., 1967. *Multivariate statistical methods*. McGraw Hill, New York, 338 p.

SIMPSON G. M., 1968. Association between grain yield per plant and photosynthetic area above the flag node in wheat. *Can. J. Plant. Sci.*, **48**, 253-760.

WALTON P. D., 1972. Factor analysis of yield in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Sci.*, **12**, 731-733.

SEAL H. L., 1966. *Multivariate statistical analysis for biologists*. Methuen, London, 207 p.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 409-423.

Effet de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par la Tomate

P. CORNILLON

avec la collaboration technique de Magali AUGE

Laboratoire d'Agronomie,
Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Un essai sous serre, en conditions bien contrôlées, nous a permis d'étudier l'influence de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par le végétal. Nous avons suivi au cours du temps les variations de composition de la solution nutritive, type Arnon et Hoagland, à deux températures caractéristiques : 12 °C et 22 °C.

Le pH de la solution nutritive subit une acidification à 12 °C quand la croissance des plantes demeure faible. Par contre à 22 °C, le pH devient alcalin concomitamment à une croissance accélérée du végétal. Ce comportement différencié de la plante se traduit par une absorption plus importante d'eau et d'éléments minéraux à 22 °C.

Le devenir des ions rentrant dans la composition de la solution nutritive dépend de la température. Ainsi à 12 °C, il apparaît une concentration du phosphore dans la solution nutritive par rapport à la solution initiale, tandis qu'à 22 °C il se produit le phénomène inverse. De même, le potassium est préférentiellement absorbé à 22 °C malgré une réduction très importante de la concentration en cet élément dans la solution nutritive. L'évolution des autres éléments : NH_4^+, NO_3^-, Ca^{++} et Mg^{++} est parallèle dans la solution nutritive aux deux températures étudiées.

L'étude de l'absorption relative des ions par rapport à l'eau consommée par la plante, permet de noter des variations intéressantes en fonction de la température des racines. La plus forte température favorise l'absorption des phosphates, des nitrates et du potassium. Par contre, l'absorption relative de l'ammonium est favorisée à faible température et il n'apparaît pas de tendance nette pour le calcium et le magnésium.

I. — Introduction

La température des racines représente un important facteur de l'environnement dont l'action sur la croissance des plantes se fait sentir rapidement au printemps au moment de la mise en place des cultures maraîchères et plus particulièrement celle de la Tomate. De nombreuses expérimentations ont permis de noter les variations, en fonction de la température du substrat, des teneurs en de nombreux éléments dans les divers tissus du végétal (Nielsen et Humphries, 1966 ; Cooper, 1973). Cependant, ces effets de la température des racines sur la composition minérale de la plante ont surtout été étudiés dans le cas d'expériences conduites sur sol ou sur tourbe. Aussi

convient-il de ne pas oublier que les phénomènes observés proviennent non seulement d'un effet direct sur la plante, mais aussi de l'action indirecte sur la disponibilité des éléments minéraux.

Parmi les rares travaux effectués en culture hydroponique sur plante entière, Williams et Vlamis (1962) ont noté, sur Orge, une absorption ionique différenciée et une acidification de la solution nutritive. L'analyse des solutions nutritives montre une diminution d'absorption des anions et des cations à basse température avec un effet surtout marqué pour les nitrates. Mais leur expérience était conduite sous une température de l'atmosphère ambiante voisine de celle du substrat ; de plus, l'éclairement n'était pas uniforme. Brouwer et van Vliet (1960) ont noté des modifications importantes de diverses caractéristiques du Pois dans un essai dont la température des racines variait entre 5 °C et 31 °C. Ainsi, c'est à 22 °C que la production de matière sèche apparaît la plus importante, ce qui entraîne une consommation maximum d'eau, de nitrates et de potassium à cette température. Le comportement du phosphore, du calcium et du magnésium n'était pas étudié. Van den Honert et Hooymans (1955) ont étudié l'absorption des nitrates par les racines de maïs au cours de périodes d'observations inférieures ou égales à 1 h. Ils ont relevé une diminution de la consommation des nitrates quand la température diminue. Cette réduction de l'absorption des nitrates se retrouve avec une solution acide (pH = 6,0) et une solution alcaline (pH = 7,4) et pour des concentrations en nitrates variant entre 1,0 et 15,0 mg . l^{-1}. De même Frota et Tucker (1972) ont travaillé sur l'absorption de l'azote ammoniacal et nitrique dans des expériences de courte durée. Ces deux formes d'azote apparaissent moins bien absorbées à basse température et cette action est surtout marquée pour les nitrates. Mais dans leurs expérimentations, la solution nutritive, dont la température à l'origine était égale à 2 °C, se réchauffait pendant leur période d'observation.

Malgré les nombreuses observations effectuées, ces expériences ne sont pas réalisées sur un matériel végétal intéressant pour les cultures maraîchères. En outre, les notations portent sur des expérimentations de courte durée avec souvent une analyse incomplète des éléments majeurs nécessaires à la nutrition.

Aussi pour étudier et préciser les effets directs de la température du substrat sur la nutrition minérale de la Tomate, nous avons mis en place dans un milieu ambiant homogène et parfaitement contrôlé, un essai en culture hydroponique.

Après avoir fixé les conditions expérimentales, nous présenterons successivement les résultats concernant les variations de pH et de concentrations ioniques de la solution nutritive en cours de culture ainsi que les prélèvements d'eau et d'éléments nutritifs par la plante. Cette technique expérimentale permet de suivre l'absorption des éléments minéraux sans sacrifier les plantes et surtout fournit un contrôle du rapport des quantités d'eau et d'éléments minéraux absorbés conjointement par la Tomate.

II. — Méthodologie

1. — *Technique culturale*

Les températures au niveau des racines (12 °C et 22 °C) que nous avons choisies tiennent compte de nos observations antérieures sur la Tomate (Cornillon, 1974).

Le tableau 1 donne les caractéristiques ioniques de la solution utilisée qui est

complétée par les oligo-éléments nécessaires à la croissance de la plante. Le dispositif expérimental correspond à celui déjà utilisé auparavant. Contrairement à ce qui se passe au champ, la température des racines a été maintenue constante pendant toute la durée de l'essai.

TABLEAU 1

Composition de la solution nutritive type Arnon et Hoagland (1940) (meq/l)

	NH_4^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Total
NO_3^-		6	8		14
$PO_4H_2^-$	1				1
SO_4^{--}				4	4
Total.....	1	6	8	4	19

Les graines d'une variété hybride de Tomate (H 63,5) ont été semées le 4 septembre. Elles ont levé entre le 9 et le 12 septembre et le repiquage a été effectué le 24 septembre, au stade 2 feuilles, dans des pots de 1 l. L'essai a été mis en place le 6 octobre et s'est poursuivi jusqu'au 27 octobre dans des conditions normales d'ensoleillement pour une culture de tomate. Cette période correspond à une croissance active de la Tomate entre le stade 4 feuilles et celui du premier bouquet apparent. La température ambiante a varié entre 21 °C et 32 °C le jour et 11 °C et 18 °C la nuit.

2. — *Prélèvements et analyses minérales*

La consommation en eau de chaque plante est relevée pendant toute la période végétative, en notant les quantités ajoutées et restantes dans le pot. Pour éviter des pertes par évaporation, le bulle à bulle d'air comprimé est saturé en vapeur d'eau et sur chaque pot une feuille de plastique permet d'obtenir une étanchéité convenable.

Le renouvellement des solutions nutritives est effectué après trois jours de culture ce qui conduit à des variations de concentration en sels du fait de la nutrition de la plante sur ce substrat. Ces différences de concentration peuvent en partie, modifier la consommation en eau à cause des variations de pression osmotique.

A chaque renouvellement de la solution nutritive, des échantillons sont prélevés. D'abord sur la nouvelle solution pour vérifier sa concentration et voir si cette dernière ne s'écarte pas trop de la composition théorique. Ensuite un deuxième prélèvement est effectué sur la solution restante dans les pots de culture pour étudier l'influence de la température sur l'absorption des ions par la plante. La comparaison des concentrations initiales et finales permet de déterminer ultérieurement les exportations en éléments minéraux pour la période de 3 jours correspondante. Le bulle à bulle d'air comprimé provoque une agitation permanente de la solution nutritive et permet d'éviter la formation d'un gradient de concentration entre les divers points du substrat.

La détermination des éléments minéraux dans les solutions nutritives est effectuée rapidement pour éviter des modifications ultérieures en cours de conservation. Les

concentrations en ions nitrates et ammonium ainsi que le pH sont mesurés avec une électrode spécifique. Le phosphore est déterminé par colorimétrie au vanadomolybdate, le potassium par photométrie de flamme et le calcium et le magnésium par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Résultats et discussion

1. — *Caractéristiques de la solution nutritive*

1.1. — *Evolution du pH.*

La figure 1 permet de suivre l'évolution du pH de la solution nutritive en fonction de la température du substrat entre le jour J_0 et le jour J_3 où le renouvellement est effectué pour chaque date. Ainsi, pour chaque période de 3 jours, nous avons noté le pH de la solution de départ et celui de la solution après utilisation par la plante. D'abord, nous observons une variation du pH de la solution initiale, et ensuite, nous notons une évolution divergente de la valeur du pH avec une acidification de la solution à 12 °C et une alcalinisation physiologique marquée à 22 °C après 3 jours de culture.

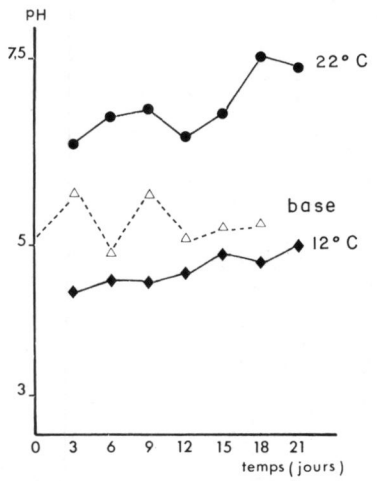


FIG. 1. — *Evolution du pH en fonction de la température de la solution nutritive.*

L'abaissement du pH atteint en moyenne une demi unité surtout au début de l'expérimentation. Par contre, l'alcalinisation est beaucoup plus importante puisque la valeur du pH augmente de 1 à 2 unités suivant la période d'observation. Il apparaît, en fonction du temps, une plus grande alcalinisation physiologique de la solution qui correspond à une croissance plus importante des plantes.

La solution nutritive utilisée a été choisie pour sa valeur de pH acide particulièrement favorable pour la croissance de la Tomate. Dans cette zone de pH, les nitrates constituent l'essentiel de l'azote présente dans la solution nutritive ce qui conduit

habituellement à une absorption prédominante des anions et provoque ainsi une alcalinisation physiologique du milieu (Street et Sheat, 1958).

Nous retrouvons cette évolution quand la température des racines est maintenue à 22 °C ce qui provoque une croissance vigoureuse des tomates. Mais à 12 °C, il se produit une acidification de la solution, liée à une moindre croissance des plantes. Williams et Vlamis (1962) avaient déjà noté une acidification de la solution nutritive avec une culture d'orge effectuée à différentes températures du milieu ambiant. La solution nutritive avait un pH de départ voisin de 5,0 et l'acidification pouvait atteindre plus d'une unité pH. Cette acidification était d'autant plus importante que la croissance des plantules d'orge était plus réduite. De même, dans notre essai, l'acidification de la solution est liée à une faible croissance de la Tomate tandis que l'alcalinisation se produit avec une croissance très vigoureuse des plantes. L'analyse de ces résultats suggère un rôle important du métabolisme de la plante pour l'évolution du pH dans le milieu de culture dans le cas d'une solution de départ acide d'un type déterminé. Plus récemment, Raven et Smith (1973) émettent une hypothèse sur le rôle des pertes d'ions H^+ ou OH^- par la plante dans les variations de pH observées dans le milieu. Ces ions H^+ ou OH^- sont produits ou utilisés par la plante au cours des processus métaboliques dont les cellules sont le siège. Comme le pH interne ne subit que de faibles fluctuations, l'excès d'ions H^+ ou OH^- est éliminé dans le milieu de culture où il en résulte des modifications de pH. Mais ces variations de pH de la solution nutritive peuvent aussi provenir des électrolytes faibles comme CO_3H_2 ou NH_4OH dont l'équilibre ionique est déplacé en fonction de leur désorption ou de leur absorption par la plante. Pitman (1970) a noté sur des racines excisées d'orge un rejet d'ion H^+ dans la solution pendant l'accumulation du potassium. Mais l'anion qui accompagne le potassium joue un rôle important dans les modifications de pH résultantes puisque le SO_4^{--} favorise beaucoup plus que l'ion chlore, la libération de protons.

1.2. — *Evolution des éléments minéraux.*

Dans notre expérimentation, les variations de pH de la solution nutritive peuvent aussi s'expliquer par les variations relatives de concentration des anions et des cations constituant le milieu nutritif.

Nous pouvons distinguer les éléments selon leur comportement sous l'effet de la température et la figure 2 donne les variations de concentrations pour les anions et les cations étudiés en fonction du traitement. Sur chaque graphique, nous retrouvons les caractéristiques de la solution de base et l'évolution sous l'influence des conditions de culture.

Anions.

Les *nitrates* se concentrent dans la solution à 12 °C et 22 °C sous l'influence de la culture. Mais à 22 °C le phénomène subit des fluctuations plus importantes. En effet, au début de l'expérimentation la solution restante est plus diluée, mais dès le 9e jour le phénomène s'inverse. Cette évolution des concentrations montre qu'il existe au stade 4 à 5 feuilles de la Tomate une absorption préférentielle des nitrates par rapport à l'eau et ensuite une inversion marquée du phénomène.

L'absorption de l'*ion* $PO_4H_2^-$ augmente fortement avec la température, pendant

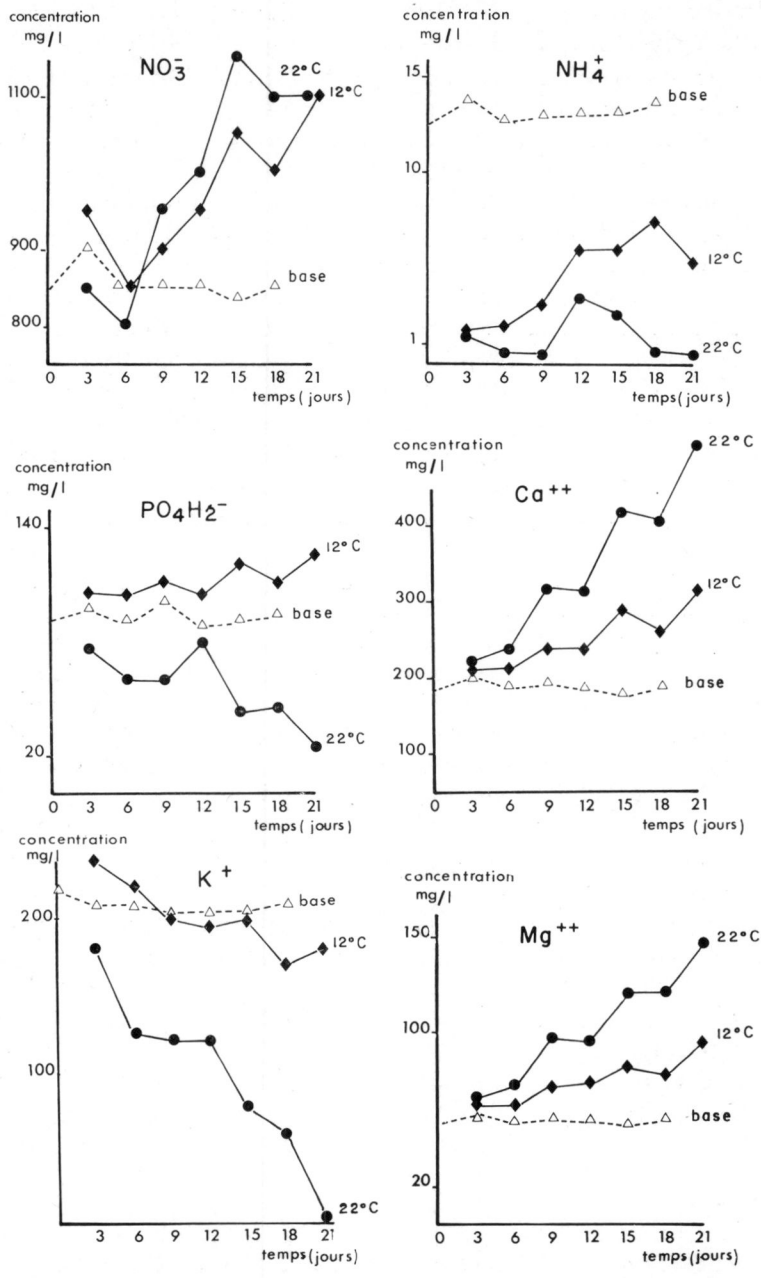


FIG. 2. — *Evolution de la concentration des éléments nutritifs dans le milieu de culture.*

toute la durée de l'essai. Aussi à 12 °C, la concentration de la solution restante devient plus forte que celle de la solution de base. Par contre à 22 °C, la solution s'appauvrit en phosphate et l'échantillon de la solution restante est moins concentré en $PO_4H_2^-$, cet appauvrissement s'accentue avec la croissance de la plante au cours du temps.

Cations.

Nous pouvons noter une absorption importante de l'*ion ammonium* aussi bien à forte qu'à faible température ce qui conduit à une diminution de la concentration de la solution utilisée par la plante.

Une interférence peut apparaître entre l'absorption et la nitrification puisque nous ne travaillons pas dans un milieu aseptique. L'absorption de l'ammonium se fait dans les mêmes conditions à pH acide et à pH alcalin à ce faible niveau de concentration.

Le *potassium* est absorbé préférentiellement aux températures élevées ce qui conduit à un appauvrissement de la solution nutritive maintenue à 22 °C. L'accentuation du phénomène devient très importante à partir du quinzième jour de l'essai pour atteindre au vingt et unième jour une concentration particulièrement réduite. Par contre à 12 °C, il n'apparaît pas de différence significative de concentration entre la solution de base et celle obtenue après drainage des pots de culture.

Pour les *ions* Ca^{++} *et* Mg^{++}, le comportement apparaît très voisin pour les deux températures étudiées. Sous l'influence de la culture, ces éléments se concentrent dans la solution à 12 °C et 22 °C. Mais à 22 °C le phénomène s'accentue fortement et la composition de la solution de drainage s'écarte beaucoup plus des caractéristiques de la solution de base.

Nous voyons que le comportement du calcium et du magnésium reste parallèle pendant toute la durée de l'essai; par contre le potassium montre un comportement parfaitement opposé.

Les modifications subies par la solution nutritive au cours du temps montrent un déséquilibre entre les différents ions en fonction du traitement appliqué et du stade végétatif de la Tomate. Ainsi, la concentration en ammonium, en potassium et en phosphates apparaît insuffisante surtout à 22 °C quand la croissance de la plante s'accentue. Par contre, les taux de nitrates et surtout ceux de calcium et de magnésium sont excessifs pendant toute la durée de l'essai. Au stade 4 feuilles, au début de l'essai, la solution nutritive apparaît bien balancée à l'exception de l'ammonium dont le niveau est vraiment trop faible. Par contre, quand on arrive au stade premier bouquet apparent, au vingt et unième jour de l'essai, les concentrations en éléments minéraux subissent de très fortes variations par rapport à la solution de base. Aussi, pour le potassium, la très grande dilution du milieu de culture de 220 mg.l^{-1} à moins de 10 mg.l^{-1} provoque une modification des conditions d'absorption de cet élément. En effet d'après Meiri (1973) l'accumulation de cet élément par les racines dépend de la concentration de la solution nutritive et l'absorption est d'autant plus forte que le milieu est plus riche en potassium. Il semble illusoire de vouloir utiliser une solution adaptée pour chaque plante puisque le stade phénologique d'un même végétal modifie considérablement les besoins en éléments nutritifs.

2. — *Comparaison des rythmes d'absorption de l'eau et des éléments minéraux*

Les deux températures de racine, 12 °C et 22 °C, induisent des consommations en eau différentes qui avaient été notées antérieurement (tabl. 2). Cette différence de consommation s'accentue au cours du temps et elle doit correspondre à un effet cumulé à long terme de ce facteur sur la plante.

Parallèlement, nous avons étudié l'influence de la température des racines sur

l'absorption des anions et des cations par la plante (tabl. 3). Globalement, ce tableau montre que les exportations des divers éléments nutritifs apparaissent toujours plus grandes à 22 °C. Ces données doivent être mises en relation avec une croissance beaucoup plus importante en volume et en poids de la plante à cette température relativement élevée des racines.

TABLEAU 2

Consommation en eau et température des racines

Date	Cons. Journalière ml/plante/jour		Cons. Cumulée ml/plante/période	
	12 °C	22 °C	12 °C	22 °C
9-10 (J_3)	81	119	242	357
12-10 (J_6)	85	152	497	812
15-10 (J_9)	119	215	855	1 456
18-10 (J_{12})	112	189	1 190	2 023
21-10 (J_{15})	159	373	1 667	3 141
24-10 (J_{18})	166	355	2 165	4 206
27-10 (J_{21})	326	645	2 817	5 496

TABLEAU 3

Action de la température des racines sur l'absorption des ions par la Tomate après 21 jours de culture (meq. par plante)

	12 °C	22 °C
NO_3^-	31,0	70,4
$PO_4H_2^-$	2,0	6,4
K^+	15,5	36,7
Ca^{++}	16,0	30,9
Mg^{++}	5,9	13,4
NH_4^+	4,1	6,0
Anions	33,0	76,8
Cations	41,5	87,0
C/A	1,26	1,13

Le rapport cations/anions absorbés s'élève légèrement quand la température des racines diminue. En effet, la température des racines de 12 °C réduit les prélèvements d'éléments minéraux, mais son action est surtout marquée pour les anions et plus particulièrement les phosphates.

Les tableaux 4 et 5 permettent de suivre au cours du temps l'absorption des anions et des cations en fonction des prélèvements en eau de la plante. Ces données fournissent une estimation de l'efficience comparée de l'absorption de l'eau et de la nutrition minérale puisque nous notons les quantités d'éléments minéraux absorbés par litre d'eau consommé par la Tomate.

TABLEAU 4

Action de la température des racines sur l'absorption des anions par la Tomate
(meq. par litre d'eau consommée)

Nombre de jours de traitement	Anion	12 °C	22 °C
3	$PO_4H_2^-$	0,6	1,3
	NO_3^-	8,7	13,7
	Total	9,3	15,0
6	$PO_4H_2^-$	0,8	1,5
	NO_3^-	13,7	18,2
	Total	14,5	19,7
9	$PO_4H_2^-$	0,5	1,1
	NO_3^-	12,3	12,8
	Total	12,8	13,9
12	$PO_4H_2^-$	0,7	1,4
	NO_3^-	10,5	11,8
	Total	11,2	13,2
15	$PO_4H_2^-$	0,6	1,0
	NO_3^-	10,2	11,1
	Total	10,8	12,1
18	$PO_4H_2^-$	0,8	1,1
	NO_3^-	10,3	12,1
	Total	11,1	13,2
21	$PO_4H_2^-$	0,8	1,1
	NO_3^-	11,6	13,1
	Total	12,4	14,2

Les anions sont moins bien absorbés à faible température. Le comportement des cations apparaît beaucoup plus variable et nous devons distinguer chacun des éléments, même si après un temps d'adaptation la quantité globale de cations absorbés par litre d'eau est comparable à 12 °C et 22 °C. En général, un ajustement se produit et la plante tend à absorber la même quantité d'un élément à 12 °C et à 22 °C chaque fois qu'elle consomme un litre d'eau.

L'élévation de température des racines provoque une augmentation dans la quantité de *phosphates* absorbée par la Tomate. Cette différence entre les traitements 12 °C et 22 °C est surtout accentuée pour les premiers jours et l'écart observé tend à s'atténuer avec le temps. Après 21 jours de traitement, la consommation de $PO_4H_2^-$ à 22 °C reste supérieure d'environ 30 p. 100 à celle notée à 12 °C par litre d'eau prélevé.

La forte réduction observée dans l'absorption des phosphates à 12 °C se produit en même temps qu'une diminution de la nutrition hydrique. Mais l'absorption des ions $PO_4H_2^-$ est davantage réduite que celle de l'eau comme en témoigne la diminution de la concentration de la solution absorbée. Russel et Shorrocks (1959) avaient déjà noté le parallélisme entre ces deux phénomènes et en avaient déduit une action du flux d'eau sur le transport des ions dans la plante quand la concentration du milieu extérieur en phosphore est grande et que le flux hydrique qui traverse la plante est élevé. Russel et Barber (1960) rapportent de nombreuses observations semblables dans des études

TABLEAU 5

Action de la température des racines sur l'absorption des cations par la Tomate (meq. par litre d'eau consommée)

Nombre de jours de traitement	Cations	12 °C	22 °C
	K^+	4,0	7,5
	Ca^{++}	5,6	5,5
3	Mg^{++}	1,9	2,7
	NH_4^+	2,4	1,8
	Total	13,9	17,5
	K^+	4,6	8,0
	Ca^{++}	6,9	9,0
6	Mg^{++}	2,2	3,2
	NH_4^+	2,7	1,6
	Total	16,4	21,8
	K^+	5,9	6,6
	Ca^{++}	4,8	6,3
9	Mg^{++}	1,6	2,3
	NH_4^+	1,7	1,1
	Total	14,0	16,3
	K^+	6,1	6,7
	Ca^{++}	6,5	5,4
12	Mg^{++}	1,6	1,9
	NH_4^+	1,5	1,1
	Total	15,7	15,1
	K^+	5,1	6,5
	Ca^{++}	4,8	4,3
15	Mg^{++}	2,0	2,1
	NH_4^+	1,2	0,9
	Total	13,1	13,8
	K^+	5,9	6,6
	Ca^{++}	5,2	4,0
18	Mg^{++}	2,1	1,9
	NH_4^+	1,0	1,0
	Total	14,2	13,5
	K^+	5,8	6,3
	Ca^{++}	6,3	6,7
21	Mg^{++}	2,8	3,2
	NH_4^+	1,0	0,9
	Total	15,9	17,1

faites sur divers végétaux. Plus récemment, Greenway et Klepper (1960) mettent en évidence une corrélation étroite entre l'absorption d'eau et le transport des phosphates vers la partie aérienne de la plante de tomate. Toutes ces observations montrent une action du métabolisme de la plante, non seulement sur la nutrition minérale, mais aussi sur l'alimentation hydrique du végétal.

En effet, il est généralement admis une action du métabolisme sur les mécanismes

d'absorption des ions, la respiration aérobie fournissant l'énergie sous forme d'A.T.P pour l'absorption des ions par les racines (Hodges, 1973; Nissen, 1974). Ainsi la température des racines agit sur les prélèvements d'éléments minéraux, mais cette action varie selon l'élément considéré.

Pour les formes d'azote, les faibles températures réduisent surtout les prélèvements de nitrates et favorisent au contraire ceux d'ammonium.

Pour les nitrates, la différence d'absorption est surtout marquée pour la première semaine, ensuite la consommation est voisine pour toutes les plantes.

Par rapport à l'eau utilisée, la plante consomme beaucoup plus de NH_4^+ à 12 °C qu'à 22 °C pendant toute la période d'étude, mais la faible teneur en NH_4^+ de la solution de base peut avoir une action sur la nutrition ammoniacale de la plante. Frota et Tucker (1972) ont observé une réduction des quantités d'ammonium et de nitrates absorbées par des laitues quand les températures de l'air et celle du substrat sont abaissées pendant la croissance des plantes. Mais le rapport du NH_4^+ au NO_3^- absorbés augmente quand la température diminue, ce qui montre que le prélèvement des nitrates est beaucoup plus affecté par la température ambiante. De même, Williams et Vlamis (1962) trouvent que l'absorption des nitrates est fortement affectée par l'abaissement de température, ainsi que Van den Honert et Hooymans (1955).

D'après les travaux de Mingeau et Robelin (1972) nous savons que la carence azotée joue sur la croissance par l'intermédiaire d'un effet de sécheresse classique : perte de turgescence et fermeture stomatique. Aussi peut-on se poser la question sur le rôle de la température et son mécanisme d'action à travers un effet sur la nutrition azotée de la plante. Mais cet effet doit être complexe puisque la température agit différemment sur l'absorption des nitrates et sur celle de l'ammonium. L'accélération des prélèvements en eau par la plante sous l'effet d'une élévation de température augmente l'absorption globale des nitrates comme cela avait déjà été noté sur les phosphates mais modifie assez peu la quantité de nitrates prélevée par litre d'eau.

De même, à 22 °C, l'absorption du *potassium* est fortement augmentée en cet élément malgré un appauvrissement très marqué de la solution nutritive. Mais à cette température l'évolution du pH se fait vers la zone des valeurs neutres à légèrement alcalines qui est particulièrement favorables pour la nutrition potassique de la plante (Jacobson *et al.*, 1957). Par contre à 12 °C, le pH devient plus acide ce qui est moins favorable pour l'absorption du potassium. Ainsi d'après les travaux de Jacobson *et al.* (1957) sur racines d'orge excisées, l'effet positif des fortes températures sur l'absorption du potassium est exalté par la modification de la valeur de pH du substrat. De plus, l'évolution observée de la concentration de la solution nutritive avec la température montre que les phénomènes métaboliques jouent un rôle dans l'absorption du potassium. En effet, d'après Hodges (1973) les cations rentrent dans les cellules par un mécanisme qui dépend d'un processus énergétique, le mouvement se faisant contre un gradient électrochimique. Même si l'on admet une distribution passive du potassium en fonction de la différence de potentiel électrochimique existant entre les deux compartiments, le potentiel apparaît posséder une composante qui provient du métabolisme de la plante.

Pour le calcium, il n'existe pas de tendance nette quand on examine son absorption en fonction de la nutrition hydrique (tabl. 5) et dans la solution de drainage, on note une concentration plus importante de cet élément aux deux températures étudiées par

rapport à la solution de base. Ce comportement peut s'expliquer par les particularités de l'absorption du calcium. En effet de nombreux auteurs admettent que l'absorption du calcium par la plante est un phénomène passif qui dépend soit de la diffusion, soit de l'adsorption sur les charges électronégatives des colloïdes cellulaires (Salsac, 1973). Mais dans notre expérimentation l'absorption n'est pas proportionnelle à la différence de concentration entre le milieu et la racine. Et contrairement à ce qui se passe pour le potassium, la zone de pH dans laquelle nous travaillons ne possède pas d'influence sur l'absorption du Ca^{++} (Salsac, 1973).

La vitesse d'absorption du *magnésium* est nettement plus faible que celle du potassium et du calcium, mais supérieure à celle de l'ammonium. Quand on analyse les prélèvements de magnésium en fonction de la nutrition hydrique, nous pouvons distinguer deux périodes : la première phase au cours de laquelle l'absorption du Mg^{++} est plus importante à 22 °C et ensuite après un temps d'adaptation le phénomène s'inverse.

La lecture des résultats révèle que l'antagonisme entre les différents ions de la solution nutritive est masqué par l'action de la température sur la nutrition minérale. En effet, l'évolution des concentrations en cours de culture est divergente selon la température du milieu. Ainsi, à 22 °C, les prélèvements globaux de potassium sont supérieurs à ceux du calcium tandis qu'à 12 °C nous trouvons le phénomène inverse. Au cours du temps, l'absorption du potassium par litre d'eau consommé est toujours inférieure à celle du calcium pour le traitement 12 °C. Par contre à 22 °C, selon la période d'observation le phénomène peut s'inverser. D'autre part, il apparaît souvent difficile de comparer des expériences de courtes durées effectuées sur racines excisées avec notre essai de durée relativement longue sur plantes entières.

IV. — Conclusions

L'expérience dont nous avons rendu compte permet d'effectuer diverses observations sur les effets exercés par la température des racines dans la nutrition minérale de la Tomate.

Le pH de la solution nutritive du type Arnon et Hoagland (1940) s'acidifie à 12 °C quand la croissance de la plante reste faible tandis qu'il devient alcalin à 22 °C quand la croissance de la Tomate est accélérée. Ce comportement différencié de la plante se traduit par une consommation d'eau et d'éléments minéraux nettement plus importante à 22 °C.

Le devenir des ions constituant la solution nutritive varie en fonction de la température. Ainsi à 12 °C, la concentration en phosphore résiduel est plus élevée qu'à 22 °C, et, à cette dernière température, elle est moins élevée que la solution initiale. De même, le potassium est préférentiellement absorbé à 22 °C malgré une réduction très importante de la concentration de cet élément dans la solution nutritive au cours du temps ce qui réduit la disponibilité en cet élément pour la plante.

Par contre, les autres éléments nutritifs montrent une évolution assez voisine à 12 °C et 22 °C, seule la concentration varie avec le traitement.

Quand on s'intéresse à l'absorption relative des ions par rapport à l'eau consommée par la plante, nous notons des modifications intéressantes entre 12 °C et 22 °C. La plus forte température favorise l'absorption des phosphates, des nitrates et du

potassium puisque la consommation d'un litre d'eau se traduit par une plus grande exportation de ces éléments. Il n'apparaît pas de tendance nette pour le calcium et dans le cas du magnésium, il se produit une adaptation de la plante aux basses températures. Seule l'absorption relative de l'ammonium est favorisée par la température la plus faible.

L'étude permet de mettre en évidence l'effet très net de la plus faible température sur la réduction de la nutrition minérale et plus particulièrement, sur celle du phosphore. Cette diminution des prélèvements de $PO_4H_2^-$ apparaît rapidement puisque après trois jours de traitement, les différences d'absorption sont supérieures de 100 p. 100 entre 12 °C et 22 °C. Cette moindre mobilisation du phosphore se traduit, au niveau de la plante, par une réduction très nette des quantités d'énergie disponibles pour la nutrition et pour la synthèse de la matière sèche. Elle conduit ainsi à une croissance très différenciée de la Tomate pendant toute la période de l'essai entre les stades 4 feuilles et premier bouquet floral apparent.

Mais ces observations ne sont valables que pour un milieu nutritif dont la concentration est élevée et pour des stades physiologiques de la Tomate très précis. Avant de tenter une généralisation souhaitable, il est nécessaire de vérifier la validité de ces résultats à d'autres stades physiologiques du végétal et, ultérieurement, d'étudier l'influence de la composition des solutions nutritives.

Ces diverses observations permettent d'expliquer, en partie, le mauvais démarrage des plantes maraîchères repiquées au printemps dans des sols encore froids malgré une température de l'atmosphère ambiante convenable. Il en résulte un retard de végétation surtout dans les terres froides d'alluvions, ce qui allonge la période végétative et fournit les récoltes trop tardivement pour espérer un bon rapport financier des cultures.

En outre, avec le développement du chauffage du sol dans les serres, de nouveaux problèmes de nutrition se poseront rapidement pour de nombreuses espèces potagères.

Reçu pour publication en juillet 1977.

Remerciements

Nous remercions vivement MM. E. Jolivet (Laboratoire d'Etude du Métabolisme Intermédiaire et de Nutrition Minérale, I.N.R.A., Versailles) et J. Morizet (Station d'agronomie, I.N.R.A., Clermont-Ferrand) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.

Summary

Effects of root temperature on the absorption of mineral elements by tomatoes

A greenhouse test under well controlled conditions allowed us to study the influence of root temperature on the absorption of mineral elements by the plant. We studied in relation to time the variations of the nutritive solution composition (Arnon and Hoagland type) at two characteristic temperatures : 12 °C and 22 °C.

The pH of the nutritive solution is subjected to acidification at 12 °C when plant growth remains weak. At 22 °C however the pH becomes alkaline and at the same time plant growth is accelerated. The differenciated behaviour of the plant is expressed in a higher absorption of water and mineral elements at 22 °C.

The fate of the ions entering the composition of the nutritive solution depends on temperature. So, at 12 °C, a phosphorus concentration appears in the nutritive solution as compared with the initial solution, whereas at 22 °C the opposite phenomenon takes place. Potassium is also preferably absorbed at 22 °C inspite of a very important reduction of this element in the nutritive solution. There is a parallel evolution of the other elements in the solution : NH_4^+, NO_3^-, Ca^{++} and Mg^{++} at the two temperatures studied.

The study of the relative absorption of ions with regard to the water consumed by the plant allows to note interesting variations in relation to root temperature. The higher temperature favours the absorption of phosphates, nitrates and potassium. On the contrary, the relative absorption of ammonium is increased at low temperatures whereas no clear tendency appears for calcium and magnesium.

Zusammenfassung

Die Wurzeltemperatur und ihre Wirkung auf die Absorbierung der mineralischen Elemente bei Tomaten

Ein Gewächshausversuch unter gut kontrollierten Bedingungen gab uns Gelegenheit, den Einfluss der Wurzeltemperatur auf die Absorbierung der mineralischen Elemente durch die Pflanze zu beobachten. Wir haben verfolgt, wie sich die Zusammensetzung der Nährlösung vom Typ Arnon und Hoagland, zeitlich verändert, und zwar bei zwei charakteristischen Temperaturen : 12 °C und 22 °C.

Im pH der Nährlösung erfolgt bei 12 °C eine Ansäuerung, wenn die Pflanzen nur schwach wachsen. Bei 22 °C hingegen wird das pH alkalisch bei gleichzeitiger Beschleunigung des Pflanzenwachstums. Dieses unterschiedliche Verhalten der Pflanzen kommt dadurch zum Ausdruck, dass sie bei 22 °C mehr Wasser und mineralische Elemente absorbieren.

Die in der Zusammensetzung der Nährlösung vorhandenen Ionen erfahren je nach Temperatur ein anderes Schicksal. So tritt im Vergleich zur Ausgamgslösung bei 12 °C eine Phosphorkonzentration in der Nährlösung auf, während sich bei 22 °C das Gegenteil ereignet. Kali wird ebenfalls bevorzugterweise bei 22 °C absorbiert, obwohl eine erhebliche Konzentrationsverminderung dieses Elements in der Nährlösung erfolgt. Die anderen Elemente (NH_4^+, NO_3^-, Ca^{++} et Mg^{++}) entwickeln sich parallel in der Nährlösung bei den zwei untersuchten Temperaturen.

Bei der Untersuchung der relativen Ionabsorbierung durch die Pflanze konnten je nach der Wurzeltemperatur interessante Abweichungen festgestellt werden. Die höhere Temperatur begünstigt die Phosphat-, Nitrat- und Kaliabsorbierung. Die relative Ammoniumabsorbierung erfolgt besser bei niederer Temperatur. Bezüglich Kalzium und Magnesium zeigte sich keine klare Tendenz.

РЕЗЮМЕ

Действие температуры корней на поглощение минеральных элементов растениями томата.

КОРНИЙОН П.

Тепличный опыт, в хорошо контролируемых условиях, позволил изучить влияние температуры корней томатов на поглощение минеральных элементов растением. Изучалось в частности изменение состава питательного раствора типа Арнон и Хогленд во времени, при двух характерных температурах : 12 °Ц и 22 °Ц.

Кислотность питательного раствора увеличивается при 12 °Ц, когда рост растений еще слаб. И, напротив, при 22 °Ц реакция раствора становится щелочной, совпадая с ускорением роста. Это различие в поведении растения выражается в увеличении поглощения влаги и минеральных элементов при температуре в 22 °Ц.

Поведение ионов входящих в состав питательного раствора диктуется, значит, температурой. Так, например, при 12 °Ц, концентрация фосфора в растворе будет бодьшей чем в растворе первоначальном, в то время как при 22 °Ц наблюдается обратное явление. Калий также предпочтительно поглощается при 22 °Ц, даже при очень ослабленной концентрации этого элемента в растворе. Эволюция всех других испытанных элементов : NH_4^+, NO_3^-, Ca^{++} и Mg^{++} в питательном растворе параллельна при обеих температурах.

Сравнительное изучение относительного поглощения ионов и поглощения влаги потребляемой растением позволяет, таким образом, отметить интересные изменения зависящие от температуры корней. Наиболее повышенная температура фаворизирует поглощение фосфатов, нитратов и калия. И, напротив, относительное поглощение аммония фаворизируется температурой пониженной. В отношении-же кашьция и магния не отмечается ясно выраженой тенденции.

Références bibliographiques

ARNON D. I., HOAGLAND D. R., 1940. Crop production in artificial culture solutions and in soils with special reference to factors influencing yields and adsorption of inorganic nutrients. *Soil Sci.*, **50,** 463-485.

BROUWER R., VAN VLIET G., 1960. De invloed van de worteltemperatur of groei en opname bij erwten. *Mededeling* 108 van het I.B.S. 23-36.

COOPER A. J., 1973. Root temperature and plant growth. *C.A.B. East Malling Kent*, 4, 1-72.

CORNILLON P., 1974. Comportement de la Tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.*, **25,** 753-777.

FROTA J. N. E., TUCKER T. C., 1972. Temperature influence on ammonium and nitrate absorption by lettuce. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36,** 97-100.

GREENWAY H., KLEPPER Betty, 1968. Relation between anion transport and water flow in tomato plants. *Physiol. Plant.*, **22,** 1, 208-219.

HODGES T. K., 1973. Ion absorption by plant root. *Adv. Agron.*, **25,** 163-207.

JACOBSON L., OVERSTREET R., CARLSON R. M., CHASTAIN J. A., 1957. The effect of pH and temperature on the absorption of potassium and bromide by barley roots. *Plant Physiol.*, **32,** 658-662.

MEIRI A., 1973. Potassium and chloride accumulation and transport by excised maize roots of different salt status, in « *Ion Transport in Plant* ». W. P. Anderson ed., 519-530. Academic Press London.

MINGEAU M., ROBELIN M., 1972. Le transfert de l'eau dans la plante : action particulière de la nutrition azotée. *Ann. agron.*, **23** (4), 419-427.

NIELSEN K. F., HUMPHRIES E. C., 1966. Effects of root temperature on plant growth. *Soils and Fertilizers*, **29,** 1, 1-7.

NISSEN P., 1974. Uptake mechanisms : inorganic and organic. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **25,** 53-79.

PITMAN M. G., 1970. Active H^+ efflux from cells of low-salt barley roots during salt accumulation. *Plant Physiol.*, **45,** 787-790.

RAVEN J. A., SMITH F. A., 1973. The regulation of intra cellular pH as a fondamental biological process in « *Ion Transport in Plant* ». W. P. Anderson ed. 271-278, Academic Press London.

RUSSELL R. S., BARBER D. A., 1960. The relationship between salt uptake and the absorption of water by intacts plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 127-140.

RUSSELL R. S., SHORROCKS V. M., 1959. The relationship between transpiration and the absorption of inorganic ion by intact plants. *J. Exp. Bot.*, **10,** 29, 301-316.

SALSAC L., 1973. Absorption du calcium par les racines de féverole (calcicole) et de lupin jaune (calcifuge). *Physiol. Vég.*, 11, 95-119.

STREET H. E., SHEAT D. E. G., 1958. The absorption and availability of nitrate and ammonium. *Encyclopedia of Plant Physiology* (W. Ruthand ed.) 8, 150-165, Springer, Berlin.

VAN DEN HONERT T. H., HOOYMANS J. J. M., 1955. On the absorption of nitrate by maize in water culture. *Acta Bot. Neerl.*, **4,** 3, 376-384.

WILLIAMS D. E., VLAMIS J., 1962. Differential cation and anion absorption as affected by climate. *Plant Physiol.*, **37,** 198-202.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 425-444.

Nouvelles observations sur l'appréciation de la fertilité des sols cultivés au moyen de l'expérimentation en petits vases de végétation

F. LEMAIRE

avec la collaboration technique de Mme Nicole DRIARD *

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches d'Angers, I.N.R.A.,
Beaucouzé 49000 *Angers*
* *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Une modification de la technique d'expérimentation en petits vases de végétation (Chaminade, 1964) est proposée pour l'étude des réserves minérales des sols cultivés. Cette modification améliore les possibilités de la technique en sols à faible capacité d'échange et en sols relativement bien pourvus.

Des exemples d'utilisation de cette technique sont proposés, permettant de choisir l'implantation d'un champ d'essai de longue durée suivant le but recherché ; de mesurer les conséquences de l'emploi d'une fertilisation minérale sur le niveau des réserves P et K d'un sol ; de montrer l'effet des exportations par les cultures sur les réserves minérales du sol en place, même après un temps court.

Cette technique est complémentaire des autres méthodes employées, en apportant des précisions aux données des analyses chimiques classiques et en permettant de prévoir le comportement d'essais au champ de longue durée.

Depuis la mise au point par R. Chaminade, en 1964, d'une technique d'étude des carences minérales au moyen de cultures d'une plante-test en petits vases de végétation, de nombreux exemples de son utilisation tant en France qu'à l'étranger peuvent être donnés.

Dans l'étude des problèmes posés par la fertilisation des sols de pays à agriculture peu évoluée, cette technique a permis l'édification d'une doctrine de mise en valeur : travaux de Killian et Velly (1964), Chaminade (1965), Bhat (1970), Bouyer (1971) pour les sols tropicaux d'Afrique et de Madagascar ; travaux de Araos (1967), Schenkel (1971) pour les andosols du Chili. Plus récemment Fritz (1974) a pu ainsi établir la carte d'utilisation agronomique des sols de la Réunion.

Dans les pays de culture intensive d'Europe où l'emploi des engrais est traditionnel, l'utilisation de cette technique a été réservée à l'étude de problèmes particuliers :

— relations entre carences en soufre et type pédologique des sols (Concaret, 1972) ;

— dynamique du phosphore et alimentation phosphatée des plantes (Kute, Blanchet et Bosc, 1967 ; Blanchet et Fioramonti, 1968).

Dans une étude comparative des techniques d'appréciation de l'aptitude des sols à alimenter les plantes en phosphore, Gachon (1966) a pris comme référence biologique quantitative les exportations totales en phosphore d'une culture de ray-grass en petits vases menée jusqu'à épuisement du sol.

— l'étude du niveau des réserves minérales de sols de grande culture a été abordée par Bricheteau, Fourbet et Huet (1971), Chaminade, Langlet et Lemaire (1971), Kowacsk et Pecznik (1972), Matev (1974). Dans ce dernier cas, il nous est apparu que des améliorations devaient être apportées à la technique originelle du fait des caractéristiques particulières des sols cultivés, leurs réserves minérales pouvant être importantes par suite de l'emploi des engrais.

Après une première partie consacrée aux modifications de la technique, nous donnerons dans une seconde partie des exemples de son application à l'étude de problèmes de fertilisation au champ, ce qui permettra de situer la technique modifiée par rapport à celles utilisées habituellement : analyse chimique des sols, essais de longue durée au champ.

A. — Méthodes et techniques

1. — *Description de la technique habituelle*

a) Un végétal, le ray-grass hybride var. Io, est cultivé dans de petits vases de végétation en matière plastique qui renferment un kilogramme de sol. L'alimentation hydrique est réalisée en arrosant jusqu'à percolation.

Les éléments minéraux autres que l'azote sont apportés en totalité au début de la culture ; chaque vase reçoit, dans le cas de la fertilisation complète : P_2O_5 : 1 000 mg; K_2O : 1 000 mg ; CaO : 350 mg ; MgO : 100 mg ; S : 100 mg ; N : 175 mg.

L'azote sous forme de nitrate d'ammoniaque est fourni chaque semaine à raison de 120 mg par pot.

Toutes les trois semaines, des coupes sont effectuées, sur lesquelles on détermine la matière sèche.

Lors de la préparation des pots, les traitements suivants sont réalisés :

1. — fertilisation complète : apport de tous les éléments minéraux,
2. — fertilisation complète moins le phosphore,
3. — — — — le potassium,
4. — — — — le calcium,
5. — — — — le magnésium,
6. — — — — les oligo-éléments,
7. — — — — le soufre.

b) Le principe de la technique est la méthode soustractive : le rendement obtenu avec la fertilisation complète est comparé avec celui donné par la fertilisation carencée en un élément. L'existence d'une différence permet de mettre en évidence une carence de l'élément considéré.

2. — *Inconvénients et limites*

L'expérience montre que, dans certains cas, cette technique présente des inconvénients :

a) Les exportations par le végétal peuvent dépasser les quantités d'éléments apportés en début d'essai comme le souligne le tableau 1 où sont reportées les quantités d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium, de magnésium et de soufre exportées par trois coupes successives de ray-grass.

TABLEAU 1

Exportations de N, P, K, Ca, Mg, S *par les* 3 *premières coupes et apports réalisés en début de culture en* mg *par pot*

Exportations	Parties aériennes			Collets	Racines	Somme des exportations	Apports
	C_1 *	C_2 *	C_3 *				
N	348,2	303,5	308,8	87,3	71,6	1 119,4	1 200
P	50,0	42,8	34,8	19,7	11,8	159,1	436
K	373,9	260,3	155,9	56,2	29,3	875,6	829
Ca	83,3	97,1	121,4	58,5	59,7	420,0	1 712
Mg	19,8	27,2	32,4	9,6	7,1	96,1	75
S	28,1	23,4	27,1	—	—	78,6	100

* C_1-C_2-C_3 indiquent les numéros des coupes.

Dans le cas présenté, il apparaît que le potassium et le magnésium sont les deux éléments qui deviennent facteurs limitants après la troisième coupe alors que le soufre le serait après la quatrième coupe.

D'après le principe de la technique il faut que le traitement fertilisation complète donne toujours un rendement élevé et ne souffre d'aucune carence.

b) Dans les sols légers la concentration des solutions du sol est élevée en début d'essai et peut alors provoquer des phénomènes de toxicité. Ce fait a été notamment observé dans les sols ferrugineux tropicaux du Sénégal.

Pour pallier ces inconvénients, tout en satisfaisant au principe de la technique, les modifications proposées portent sur les quantités et le mode d'apport des éléments fertilisants.

3. — *Technique proposée*

Le mode opératoire est le suivant :

— apports des éléments fertilisants dans le pot au moment de la préparation, sous forme de solutions (tabl. 2). Les éléments azote et potassium sont fournis en petites quantités (respectivement 175 mg et 250 mg) alors que le phosphore est apporté en totalité (1 000 mg P_2O_5) : en effet des phénomènes dépressifs ne sont observés qu'à partir de 2 000 mg P_2O_5 et les exportations après huit coupes ne représentent que la moitié des apports, d'après les résultats d'essais non rapportés ici ; les oligo-éléments sont fournis, comme dans la technique d'origine, sous forme d'un complexe commer-

TABLEAU 2

Nature et quantité des éléments nutritifs apportés suivant le traitement réalisé

Nature du traitement réalisé	Apports dans le pot					Apports hebdomadaires			
	N = 175 mg ; P_2O_5 = 1 000 mg ; K_2O = 250 mg					N = 120 mg ; K_2O = 100 mg ; Mg = 20 mg ; S = 20 mg			
	Azote sous forme de		Acide phosphorique sous forme de	Potasse sous forme de	Oligo-éléments totaux sous forme de	Solution N, K, Mg, S	Solution N, Mg, S	Solution N, K, S	Solution N, K, Mg
	$Ca(NO_3)_2$	NH_4NO_3	NaH_2PO_4, 2 H_2O	$KHCO_3$	Nutramine				
Fertilisation complète (1) ..	+		+	+	+	+			
Moins le phosphore (2)	+			+	+	+			
Moins le potassium (3).....	+		+		+		+		
Moins le calcium (4).....		+	+	+	+	+			
Moins le magnésium (5) ...	+		+	+	+			+	
Moins oligo-éléments (6) ..	+		+	+		+			
Moins le soufre (7)	+		+	+	+				+

Concentration des solutions en g/l

$Ca(NO_3)_2$	: 51,25
NH_4NO_3	: 25,71
NaH_2PO_4, 2 H_2O	: 109,86
$KHCO_3$	: 26,58
Nutramine	: 1,5

Composition de la nutramine en p. 100

Mn	: 9,79
Fe	: 6,02
Cu	: 3,20
B	: 2,10
Zn	: 3,06
Mo	: 0,46

Concentration des solutions apportées chaque semaine en g/l

	N, K, Mg, S	N, Mg, S	N, K, S	N, K, Mg
NH_4NO_3	7,057	11,311	10,388	9,557
KNO_3	10,744	—	10,744	10,744
$Mg(NO_3)_2$, 6 H_2O	10,666	10,666	—	10,666
$(NH_4)_2SO_4$ ..	4,125	4,125	4,125	—

TABLEAU 3

Caractéristiques physiques et chimiques des sols utilisés

Sols	p. 100 terre sèche						p. 1 000 terre sèche						
	Argile	Limon	Sable fin	Sable grossier	Calcaire total	M. O. totales	N total	P_2O_5 assimilable Dyer	P_2O_5 assimilable J.-H.	K_2O Ech.	CaO Ech.	MgO Ech.	pH eau
1	12,0	24,5	52,0	7,7	0	0,6	0,47	0,015	—	0,14	4,34	0,21	6,5
2	15,2	16,8	50,1	17,8	48,5	2,99	2,24	—	0,43	0,42	—	0,11	7,9
3	34,1	8,9	22,5	30,7	2	3,14	2,48	—	0,16	0,22	—	0,14	7,5
4	44,0	32,9	16,7	2,9	1,76	2,85	2,23	—	0,67	1,15	—	1,05	7,7
5	41,1	28,0	25,4	0,9	17,5	5,00	3,72	—	0,23	0,51	—	0,14	7,7
6	16,9	22,6	48,0	8,3	0	3,75	2,15	0,40	—	0,44	0,93	0,03	5,4
7	16,3	11,1	69,4	1,4	0	1,14	0,85	0,25	—	0,09	1,96	0,08	6,1
8	21,9	20,3	54,6	1,5	0	1,50	0,19	0,17	—	0,19	2,99	0,12	6,5
9	11,1	33,6	46,4	5,0	0	1,61	0,82	0,07	—	0,08	8,40	0,63	6,8

cial, appelé nutramine, à raison de 10 ml d'une solution à 1,5 g/l, cette concentration ne provoquant pas de phénomène de toxicité ;

— apports hebdomadaires : ils débutent quatre jours après la levée ou après la coupe et fournissent les quatre éléments azote, potassium, magnésium et soufre à raison de 20 ml d'une des quatre solutions indiquées dans le tableau 2.

4. — *Contrôle de la technique proposée*

On a utilisé des sols d'origines variées : champs d'essai de longue durée, grande culture. Leurs caractéristiques physiques et chimiques sont indiquées dans le tableau 3.

a) *Comparaison des deux techniques.*

Evolution des rendements du traitement fertilisation complète.

Le traitement fertilisation complète doit donner les rendements les plus forts permis par les conditions climatiques du moment pendant toute la durée de l'expérimentation. Ce n'était pas toujours le cas avec la technique utilisée jusqu'à présent. A titre d'exemple, un essai effectué sur le sol numéro 1 du tableau 3, dans les mêmes conditions climatiques, permet de comparer les rendements des traitements fertilisation complète obtenus par les deux techniques (tabl. 4).

TABLEAU 4

Rendements moyens (en g MS) *obtenus avec les 2 techniques sur le traitement fertilisation complète*

Numéro de la coupe	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
Technique habituelle	5,51	8,40	6,82	4,70	1,94	0,34	0	0
Technique modifiée	6,01	9,18	7,57	7,04	6,78	5,81	4,90	4,50

Le rendement moyen est le même pour les trois premières coupes, mais à partir de la quatrième apparaît un écart qui va grandissant avec la poursuite de la culture.

La technique modifiée permet donc de maintenir le rendement d'un plus grand nombre de coupes à un niveau plus élevé que celui de la technique classique. Il faut remarquer que les rendements ne restent pas à un niveau constant par suite de la variation des conditions climatiques entre la première et la huitième coupe et du vieillissement des plantes. Une éventuelle carence en oligo-éléments peut aussi être invoquée puisque tous les oligo-éléments ont été apportés en début de culture ; les résultats d'essais, à dates de semis décalées dans le temps, ne permettent pas de confirmer cette hypothèse pour les sols utilisés ; mais dans le cas de certains sols légers un apport d'oligo-éléments en cours de culture peut être envisagé pour se prémunir contre l'apparition de ce facteur limitant.

Manifestation des carences.

Sur les sols 1 et 2 du tableau 3, de richesse différente en éléments fertilisants, les deux techniques ont été employées de manière à voir si la modification proposée joue

sur l'ordre d'apparition et sur l'intensité des carences. Les résultats sont présentés sur les figures 1 et 2 : on porte les quantités sommées de matière sèche produites par le traitement fertilisation complète en abscisses, les indices de rendement IR obtenus à chacune des coupes en ordonnées. Cet indice IR est calculé ainsi pour une coupe donnée :

$$IR = \frac{\text{Rendement du traitement carencé} \times 100}{\text{Rendement du traitement fertilisation complète}}.$$

La considération de l'ordonnée à l'origine de chacune des courbes obtenues par épuisement de chaque élément peut être prise comme une mesure de fertilité actuelle. En utilisant les normes d'interprétation de Killian et Velly (loc. cit.) d'après lesquelles un indice IR inférieur à 70 p. 100 correspond à un état de carence visible au champ, les carences pourront être hiérarchisées au départ : on appellera carence primaire celle qui limitera le rendement en premier lieu.

La pente des courbes permet d'apprécier la vitesse de l'épuisement des réserves ; on parlera de carences secondaires si la courbe franchit le seuil de 70 p. 100. Une hiérarchie des carences dans le temps pourra ainsi être établie.

- *Cas du sol n°* 1 (fig. 1) :

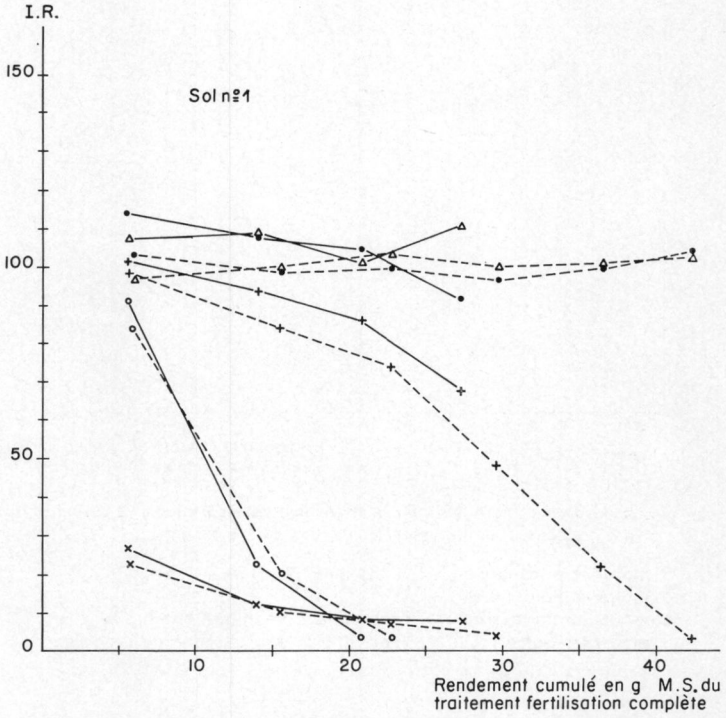


FIG. 1. — *Comparaison des indices de rendement des traitements carencés obtenus par les deux techniques sur le sol n° 1.*

■ moins le magnésium
o moins le soufre
× moins le phosphore
\+ moins le potassium
△ moins les oligo-éléments

Trait plein : technique habituelle
Trait interrompu : technique modifiée

Les techniques habituelle et modifiée donnent les mêmes résultats pour l'appréciation des réserves minérales en phosphore, potassium, magnésium, soufre et oligo-éléments.

• *Cas du sol n° 2* (fig. 2) :

Les deux techniques, équivalentes jusqu'à la troisième coupe, donnent ensuite des résultats différents : l'épuisement des réserves en phosphore, potassium et magnésium est bien mis en évidence avec la technique modifiée alors que la technique habituelle ne fait rien apparaître. Cela résulte de la relative constance du traitement fertilisation complète pendant la durée de l'essai.

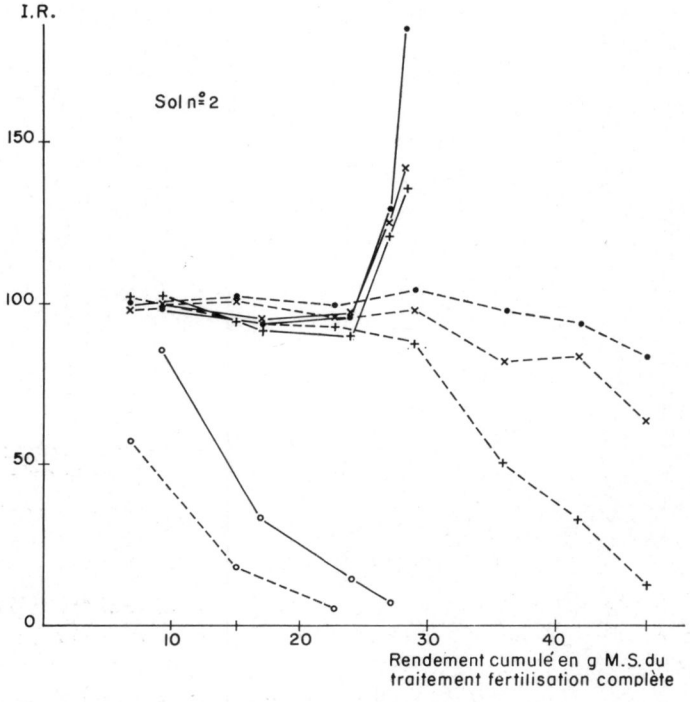


FIG. 2. — *Comparaison des indices de rendement des traitements carencés obtenus par les deux techniques sur le sol n° 2.*

× moins le phosphore
\+ moins le potassium
● moins le magnésium
o moins le soufre

Trait plein : technique habituelle
Trait interrompu : technique modifiée

— *Commentaires.*

L'ordre d'apparition et la gravité des carences sont identiques avec les deux techniques dans le cas où le sol possède de faibles réserves ; par contre dans le cas contraire, qui est souvent celui des sols cultivés, la modification de la technique a permis de suivre l'évolution des réserves minérales et de mettre en évidence des carences n'apparaissant qu'à partir de la cinquième ou même septième coupe.

b) *Reproductibilité de la technique modifiée.*

Sur un même échantillon de sol (sol nº 2 du tabl. 3) provenant d'un seul prélèvement séché à l'air et conservé dans cet état, la détermination des carences a été effectuée trois ans de suite entre le 1er mai et le 31 octobre :

— pour le potassium (fig. 3) les trois courbes d'épuisement présentent la même allure. La reproductibilité est bonne pour l'appréciation du niveau initial des réserves et de la vitesse de leur épuisement ;

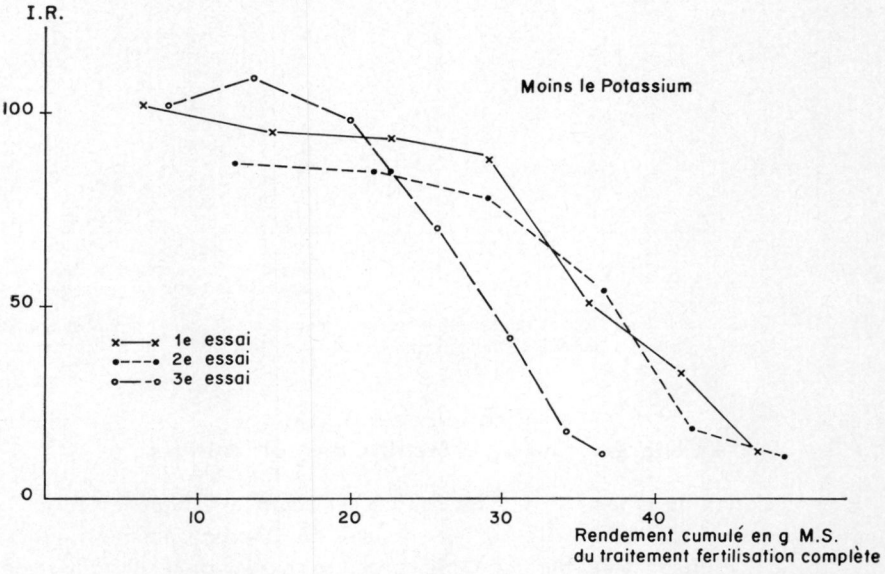


FIG. 3. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en potassium obtenus par 3 répétitions successives sur le même sol.*

— pour le phosphore (fig. 4) et le magnésium (non représenté), la reproductibilité des courbes d'épuisement est bonne également ; les réserves ne s'appauvrissent que lentement ;

— pour le soufre (fig. 4), la reproductibilité est faible pour l'appréciation du niveau initial des réserves mais elle est bonne pour la vitesse de leur épuisement.

5. — *Conclusions*

La technique proposée permet, au prix d'une légère modification dans les apports hebdomadaires et sans changer la hiérarchie des carences :

- de diminuer la salinité au départ et d'opérer avec des sols à faible capacité d'échange,
- de maintenir les rendements du traitement fertilisation complète à un niveau élevé pendant un plus grand nombre de coupes, et ainsi de mettre en évidence des carences plus longues à apparaître dans le temps, donc d'étudier des sols possédant des réserves minérales assez importantes.

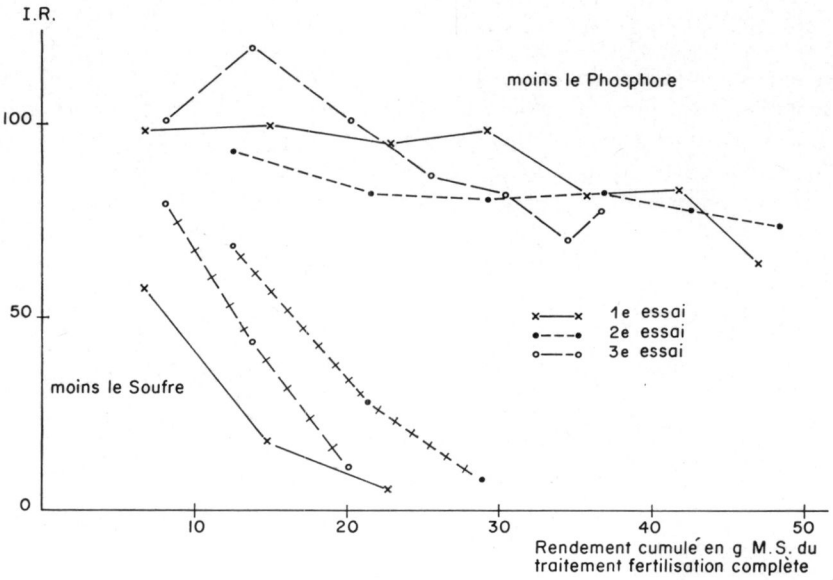


FIG. 4. — *Comparaison des indices de rendement des traitements carencés en phosphore et en soufre obtenus par 3 répétitions successives sur le même sol.*

B. — Application de la technique à l'appréciation de la fertilité des sols cultivés

L'appréciation de la fertilité des sols cultivés est réalisée habituellement à l'aide d'analyses permettant d'évaluer les teneurs des sols en différents éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes. Or le caractère conventionnel et statique de ces déterminations ne permet pas toujours de rendre compte des phénomènes observés lors d'essais au champ de longue durée.

La technique des vases de végétation apporte un complément d'information aux résultats obtenus par les autres moyens (analyses chimiques, essais au champ). Les exemples suivants sont destinés à montrer cet intérêt.

1. — *Mise en évidence de l'action de la fertilisation apportée au champ sur le niveau des réserves P et K du sol*

a) *Conditions de l'essai.*

Dans un champ d'expérience de longue durée sur un limon battant de la région du Perche (sol nº 9 du tabl. 3) où plusieurs équilibres de fertilisation étaient réalisés, les sols des traitements sans fertilisation et avec fumure NPK ont été prélevés après la quatrième année de culture.

Le tableau 5 précise les quantités d'éléments fertilisants en N, P_2O_5 et K_2O apportés chaque année ainsi que la nature des cultures et leurs rendements.

La fumure a apporté en quatre ans 604 kg de P_2O_5 et 309 kg de K_2O par ha.

La comparaison des rendements en maïs-grain en début et en quatrième année d'expérience fait apparaître une baisse dans la parcelle sans fertilisation et une stabilité dans la parcelle NPK.

TABLEAU 5

Quantités d'éléments fertilisants apportées chaque année, cultures pratiquées et rendements obtenus sur les parcelles Témoin et NPK au champ

Culture pratiquée		Parcelles	
		Témoin	$N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$
Maïs grain	Fertilisation kg/ha	0	106 - 157 - 64
	Rendement q/ha.....	41,2	63,7
Blé de printemps	Fertilisation kg/ha	0	96 - 120 - 64
	Rendement q/ha.....	15,7	37,0
Orge de printemps	Fertilisation kg/ha	0	72 - 90 - 48
	Rendement q/ha.....	18,6	46,4
Ray-gras dérobé	Fertilisation kg/ha	0	91 - 67 - 61
	Rendement q/ha.....	4,0	25,0
Maïs grain	Fertilisation kg/ha	0	122 - 170 - 72
	Rendement q/ha.....	19,3	69,7

b) *Résultats de l'essai en vases de végétation* : figures 5 et 6.

Le sol de la parcelle sans fertilisation présente une carence primaire en phosphore et une carence secondaire en potassium. Après quatre ans de cultures et d'apports d'éléments fertilisants, le sol de la parcelle NPK ne présente pas de carence primaire en

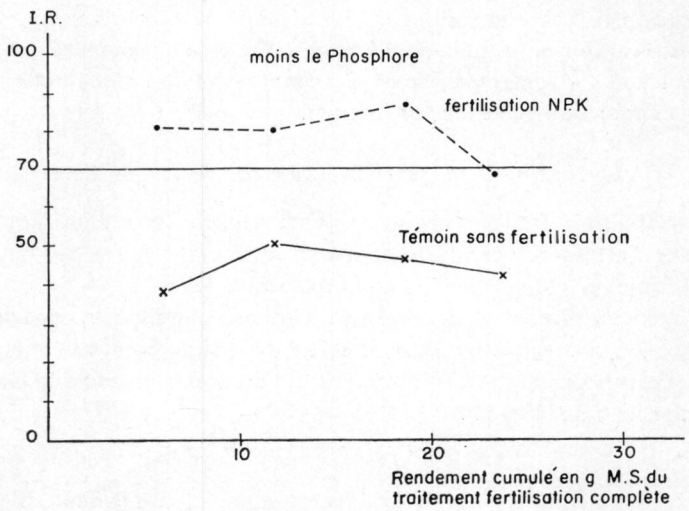


FIG. 5. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en phosphore sur les sols provenant des parcelles témoin sans engrais et avec NPK au champ.*

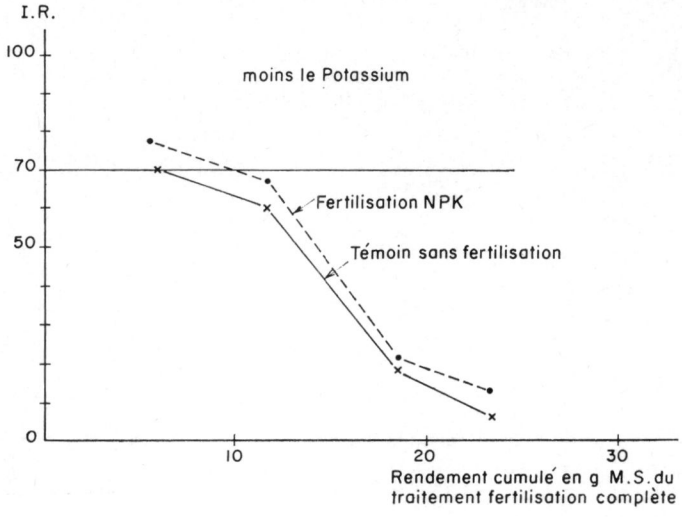


FIG. 6. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en potassium sur les sols provenant des parcelles témoin sans engrais et avec NPK au champ.*

phosphore, mais la carence en potassium existe avec la même intensité que dans la parcelle sans fertilisation ; le premier facteur limitant est alors le potassium.

La fertilisation pratiquée au champ peut être considérée comme déséquilibrante puisqu'elle a corrigé la carence en phosphore et a maintenu le potassium à son niveau initial faible.

Des analyses de sol réalisées à la fin du premier assolement ont montré une augmentation de la teneur en phosphore assimilable et une stabilité du taux de potasse échangeable dans les parcelles NPK.

Les essais en vases de végétation nous montrent de plus que les réserves en phosphore sont capables d'assurer l'alimentation pendant quatre coupes alors que pour le potassium les réserves sont rapidement épuisées. On peut en conclure que, dans ce sol, il faut surveiller attentivement le niveau des réserves et de l'alimentation potassiques afin d'éviter l'apparition de ce facteur limitant.

2. — *Implantation de champs d'essai de longue durée*

Avant de choisir entre les diverses implantations possibles d'un champ d'essai de longue durée, il est intéressant de comparer le niveau et l'allure de l'épuisement des réserves minérales de chacun des sols correspondants.

Dans l'exemple suivant, le but de l'essai était de connaître les caractéristiques de six sols de grande culture (sols n° 3, 4, 5, 6, 7, 8 du tabl. 3) où devaient être implantés des champs d'essais de longue durée comportant différents niveaux de fertilisation PK sans distinguer les deux éléments.

Résultats.

— Réserves minérales en calcium, magnésium, oligo-éléments (fig. 7, magnésium ; calcium et oligo-éléments non représentés) : les six sols sont largement pourvus en ces éléments et il n'est pas nécessaire d'apporter une fumure pour éviter l'apparition

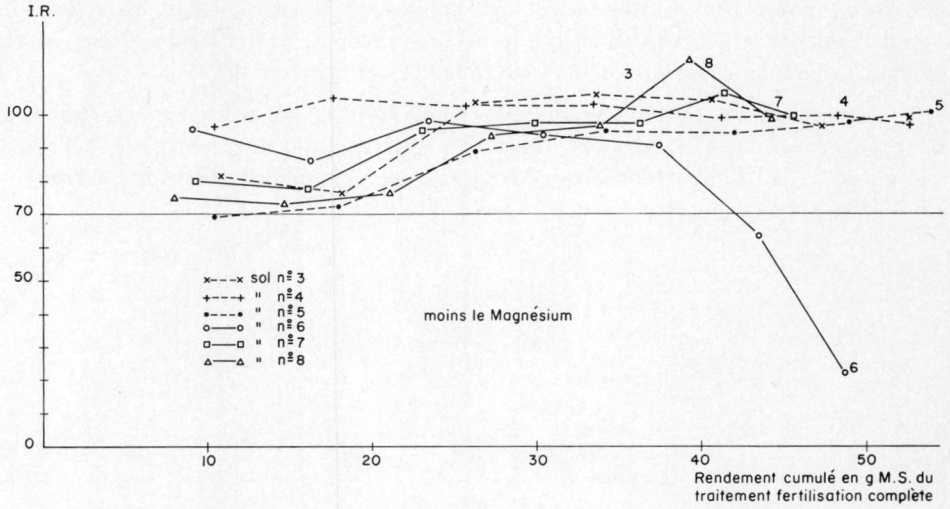


FIG. 7. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en magnésium obtenus sur six sols de grande culture.*

d'un facteur limitant autre que ceux voulus par le protocole. Il faut remarquer que le sol n° 6 permet d'alimenter correctement les plantes en magnésium pendant six coupes bien que l'analyse chimique révèle un taux extrêmement bas de magnésium.

— Réserves minérales en soufre (fig. 8) : le niveau de départ est bon mais l'épuisement est très rapide. Il faut cependant remarquer que les réserves en soufre se trouvent essentiellement ici sous forme organique et que la technique ne permet pas de les évaluer car la minéralisation de la matière organique est perturbée dans les conditions de culture en pots. Il ne faut pas oublier, en outre, que des apports extérieurs de soufre

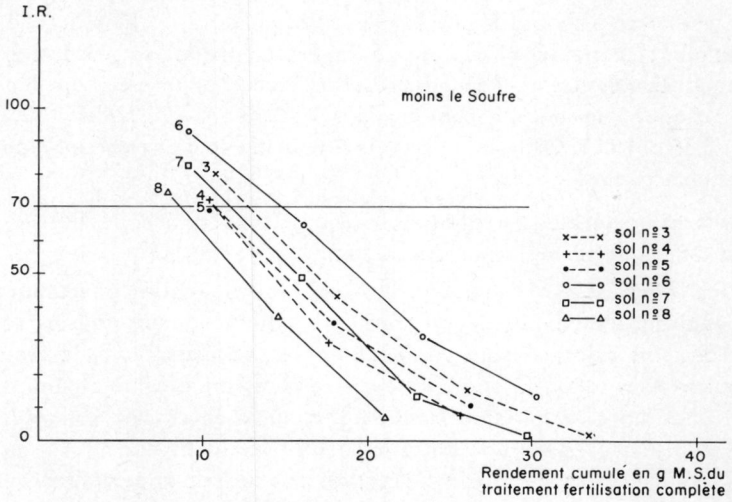


FIG. 8. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en soufre obtenus sur 6 sols de grande culture.*

par l'atmosphère sont possibles et gênent l'appréciation des réserves. Dans les sols apparaissant les moins bien pourvus il serait prudent de surveiller l'alimentation en cet élément suivant les conditions de l'année et de l'environnement.

— Réserves minérales en potassium (fig. 9) : les six sols ne présentent pas de carence primaire mais leurs réserves s'épuisent différemment : dans l'ordre décroissant de l'importance des réserves, le classement est le suivant : sol n° 4 > sol n° 5 > sols n° 3, 8, 6 > sol n° 7.

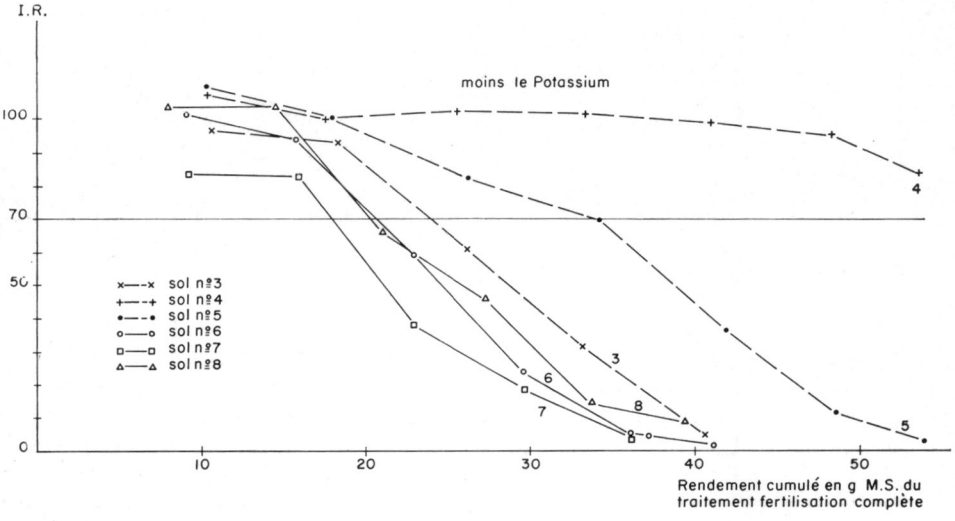


FIG. 9. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en potassium obtenus sur 6 sols de grande culture.*

La comparaison à partir des données de l'analyse chimique : sol n° 4 > sol n° 5 > sol n° 6 > sols n° 3 et 8 > sol n° 7 fait apparaître un bon accord pour les trois sols les plus riches et le sol le plus pauvre. Par contre les sols n° 3, 8 et 6 ont des vitesses identiques d'épuisement de leurs réserves en potassium alors que leurs teneurs en potasse échangeable sont différentes : sol n° 8 : 0,15 p. 1 000, sol n° 3 : 0,18 p. 1 000 et sol n° 6 : 0,36 p. 1 000. Or le sol n° 6 est le plus acide, le plus riche en matière organique et le plus pauvre en argile des trois sols considérés.

— Réserves minérales en phosphore (fig. 10) : l'allure de l'épuisement des réserves est différente suivant la présence ou non de calcaire.

• *sols calcaires* (sols n° 3, 4, 5) : ils n'ont pas de carence primaire et leurs réserves s'épuisent lentement. Or on considère habituellement que les réserves en phosphore des sols calcaires sont peu assimilables. Le classement de ces sols est le suivant : sol n° 4 > sols n° 3 et 5 ; il peut être comparé à celui obtenu d'après les teneurs en phosphore assimilable Joret-Hébert où la succession est sol n° 4 > sol n° 5 > sol n° 3. L'accord est bon entre les deux techniques mais celle des vases de végétation montre en outre que ces réserves sont assez importantes, puisqu'elles subviennent aux besoins de sept coupes de ray-grass.

• *sols non calcaires* (sols n° 6, 7, 8) : l'allure des courbes d'épuisement est diffé-

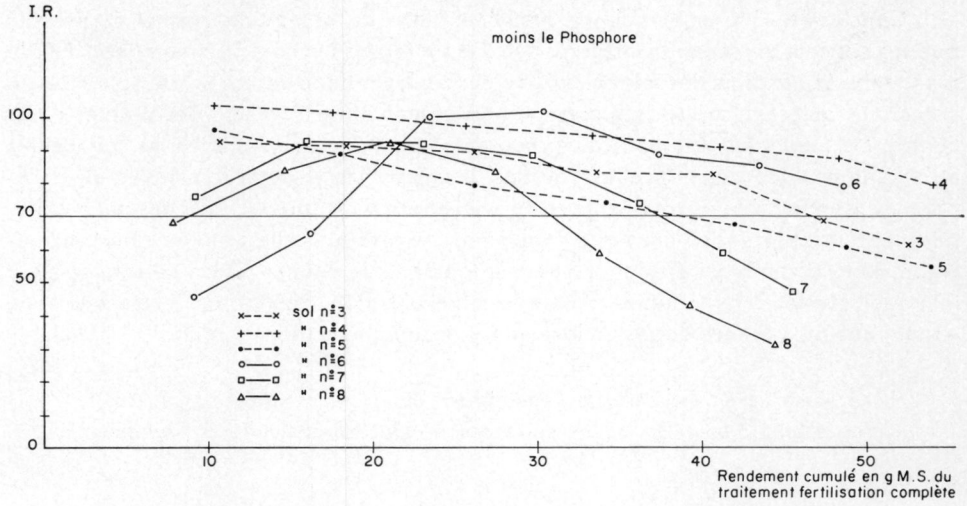


FIG. 10. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en phosphore obtenus sur 6 sols de grande culture.*

rente : le sol n° 6 présente une carence primaire alors que les deux autres sols sont en état de subcarence ; cette carence voit son intensité diminuer avec le nombre de coupes ; le phénomène est d'autant plus visible que le pH du sol est plus bas. Il semble que les réserves en phosphore se libèrent de plus en plus avec la poursuite de l'expérience. Le classement d'après les résultats de la première coupe : sol n° 7 > sol n° 8 > sol n° 6 est en profond désaccord avec le classement établi d'après les teneurs en phosphore assimilable Dyer : sol n° 6 > sol n° 7 > sol n° 8.

Le sol n° 6 avec 0,40 p. 1 000 de phosphore assimilable donne lieu à une carence en première coupe. Pour expliquer ce résultat on peut faire appel à la notion de pouvoir fixateur du sol pour le phosphore. Dans le tableau 6 sont comparés l'indice de rende-

TABLEAU 6

Indices de rendement en 1re coupe, pouvoirs fixateurs, et taux de phosphore assimilable Dyer des 3 sols 6, 8, 7

Sol	Indice de rendement en 1re coupe	Pouvoir fixateur en p. 100	P_2O_5 assimilable Dyer en p. 1000
N° 6	45,7	99,6	0,40
N° 8	68,7	88,0	0,17
N° 7	76,6	83,2	0,25

ment en première coupe, le taux de phosphore assimilable Dyer et le pouvoir fixateur par la technique Demolon (1953) modifiée par Blanchet (1963) des trois sols n° 6, 7, 8.

Le sol n° 6 ayant la carence la plus forte en première coupe est celui qui possède le pouvoir fixateur le plus élevé. Il faut noter qu'il est acide et riche en matière organique.

Conclusions : la technique des essais en vases de végétation permet de prévoir que les six sols ne répondront pas de la même façon à une expérimentation PK de longue durée : la série des sols calcaires a des réserves importantes en phosphore et en potassium qui sont capables d'assurer une alimentation correcte des plantes ; par contre, c'est avec les sols non calcaires et plus particulièrement avec les sols acides et organiques que des difficultés pourraient apparaître pour la fourniture du phosphore. La notion de pouvoir fixateur du phosphore (Gachon, loc. cit.) permet d'expliquer les faits observés en première coupe mais ne résoud pas le problème de la disparition de la carence en phosphore avec le nombre de coupes. Dans ce cas, on peut invoquer plusieurs hypothèses comme la minéralisation, l'action des racines ou une dynamique particulière du phosphore en sol organique acide.

3. — *Mise en évidence de l'épuisement des réserves minérales du sol d'un champ d'essai de longue durée sous l'influence des cultures pratiquées*

a) *Dispositif au champ.*

Un essai de longue durée effectué sur sol brun calcaire dans la plaine de Caen (sol n° 2 du tabl. 3) comprend divers équilibres de fertilisation et notamment un témoin sans apport d'engrais ni de fumier.

La succession des cultures et la moyenne des rendements des parcelles correspondantes sont reportées au tableau 7.

TABLEAU 7

Moyenne des rendements (q/ha) *des cultures successives pratiquées sur les parcelles Témoin sans engrais*

Année	Nature de la culture	Rendement
1971	Orge Printemps.....	26,5
	Ray-grass dérobé	15,6
1972	Maïs grain	14,16
1973	Blé Hardi	27,03
	Ray-grass dérobé	23,44

b) *Essais en vases de végétation.*

— Les essais ont porté sur des échantillons de sols provenant de ces parcelles, après les première et troisième années de culture et sur l'échantillon de sol prélevé avant le début de l'expérimentation. Ainsi l'évolution des réserves connues initialement peut être suivie après un et trois ans d'essai.

Pour chaque année, les essais en pots comprenaient les traitements suivants répétés trois fois :

— F.C. : fertilisation complète,
— P : F.C. moins le phosphore,
— K : F.C. moins le potassium.

• Pour le phosphore (fig. 11) les courbes obtenues restent voisines. Il faut remarquer que le sol était riche en phosphore et que les exportations par les cultures sur les parcelles témoins, sans apport d'azote, ne sont pas importantes ; l'épuisement au champ est donc lent.

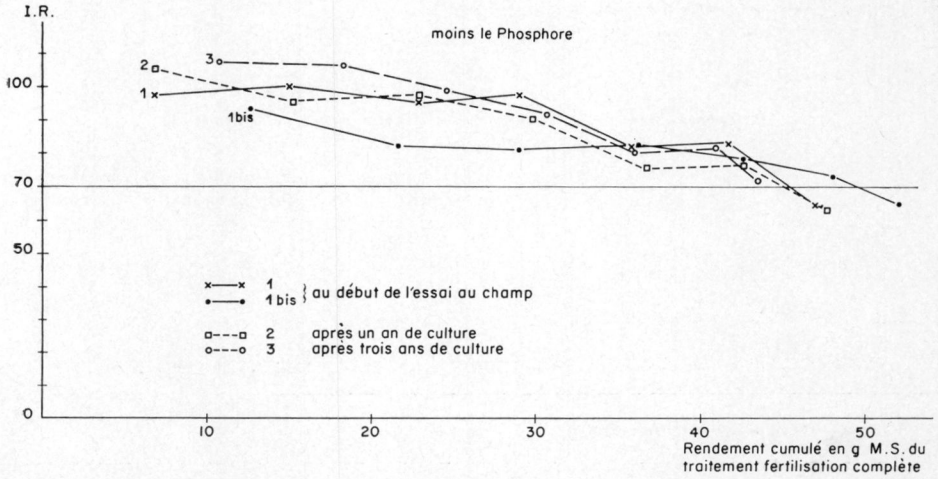


FIG. 11. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en phosphore obtenus sur le même sol, au début et après* 1 *et* 3 *ans de culture.*

• Pour le potassium (fig. 12) l'évolution peut être appréciée de la façon suivante : les courbes représentant l'épuisement des réserves montrent une rupture de pente dont l'abscisse se déplace vers la gauche du graphique en fonction du temps de culture : 29,07 et 29,13 g MS pour le sol au début de l'expérimentation (courbes 1 et 1 *bis*) ; 22,91 g MS après un an de culture (courbe 2) ; 24,55 g MS après trois ans de culture

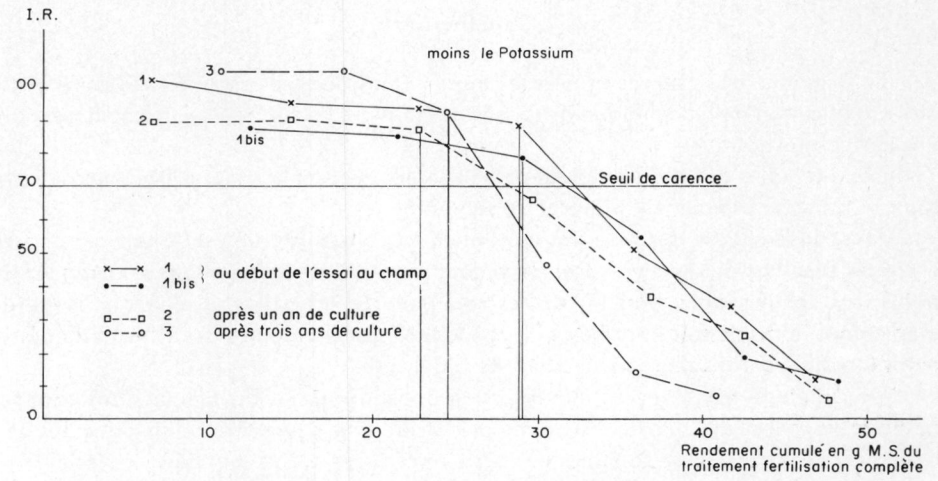


FIG. 12. — *Comparaison des indices de rendement du traitement carencé en potassium obtenus sur le même sol, au début et après* 1 *et* 3 *ans de culture.*

(courbe 3). Un calcul de variance montre que ces valeurs sont différentes au seuil 1 p. 100. Les réserves en potassium du sol ont diminué et une moins grande quantité de matière sèche a été produite avant l'apparition de la carence.

Ces réserves peuvent être considérées comme en relation avec les exportations de potassium jusqu'au point de rupture de pente. Le tableau 8 montre que les exportations diminuent avec le temps de culture au champ.

TABLEAU 8

Exportations de K en mg en fonction du temps de cultures

	K exporté moyen en mg	Nombre de répétitions	Exportations relatives
Avant essai au champ	492,2 **	6	100
Après 1 an d'essai	417,0	3	86
Après 3 ans d'essai	392,9	3	79

** Différence significative au seuil 1 p. 100.

Un calcul de variance a montré que l'essai était hautement significatif ; les différences entre les réserves ainsi évaluées au début de l'essai au champ et après un ou trois ans de culture sont significatives alors qu'elles ne le sont pas entre un et trois ans.

La diminution des réserves en potassium de ce sol a pu être mise en évidence parce que le sol possédait des réserves en potassium moins importantes que celles en phosphore ; les cultures ont exporté plus de potassium que de phosphore et le lessivage du potassium a été plus accusé que celui du phosphore.

Conclusions

La présence de réserves minérales importantes dans les sols cultivés a nécessité une modification de la technique originelle permettant de suivre l'épuisement pendant une durée plus longue.

Des exemples de l'application de cette technique modifiée à des problèmes de fertilisation au champ montrent l'intérêt de son emploi.

Ainsi dans l'étude des réserves minérales en potassium, s'il est apparu un accord entre les résultats obtenus en vases de végétation et les déterminations analytiques du potassium échangeable dans le cas des sols pauvres ou riches, il n'en a plus été de même dans le cas de sols intermédiaires où la technique a montré des vitesses d'épuisement identiques dans des sols de richesse différente.

Dans l'étude des réserves minérales en phosphore, des problèmes sont apparus non pas dans les sols calcaires, comme on aurait pu s'y attendre, mais dans des sols acides où des carences se sont manifestées en première coupe alors que les teneurs en phosphore assimilable étaient élevées. La détermination du pouvoir fixateur permet d'expliquer en partie le phénomène.

Les conséquences d'une fertilisation déséquilibrée ainsi que celles des prélèvements par les cultures, en un an seulement, ont été mises en évidence à l'aide de cette technique, qui se révèle sensible et complémentaire d'autres techniques.

Son emploi avant la mise en place d'essais de longue durée permet de choisir les sols répondant le mieux au but fixé et d'anticiper sur les résultats obtenus au champ.

Reçu pour publication en juillet 1977.

Summary

New observations concerning the cultivated soil fertility by means of experimentation in small vegetation containers

A modification of the technique of experimentation in small vegetation containers (Chaminade, 1964) is proposed in order to study the mineral reserves of cultivated soils. This modification improves the possibilities of the technique in the case of soils with low exchange capacity and relatively well provided soils.

Examples of utilizing this technique are proposed which allow the implantation of a long term experiment according to the aim of the study ; to measure the consequences of the utilization of mineral fertilizers on the level of P and K reserves in soils ; to show the effect of removal of nutrients by crops on the soil mineral reserves, even after a short time.

This technique completes the other utilized methods giving more accurate data in classical chemical analysis and allowing to have a prevision on the behaviour of crops during long term field experiments.

Zusammenfassung

Neue Beobachtungen über die Fruchtbarkeitsbewertung kultivierter Boden an Hand von Vegetationsgefässversuchen

Es wird eine Verfahrensabänderung für Versuche in kleinen Vegetationsbehältern zur Untersuchung der Mineralreserven kultivierter Böden vorgeschlagen. Diese Abänderung verbessert die Möglichkeiten des Verfahrens bei Böden mit schwacher Austauschfähigkeit und bei relativ reichen Böden.

Anwendungsbeispiele dieses Verfahrens werden vorgeschlagen, die die Anlage eines Feldes für langfristige Versuche zu diesem Zweck ermöglichen, d. h. zur Messung der Folgen einer mineralischen Düngung auf die P und K Reservenhöhe des Bodens und um die Wirkung aufzuzeigen, die der Entzug durch den Anbau auf die mineralischen Reserven eines gegebenen Bodens sogar kurzfristig verursacht.

Dieses Verfahren ergänzt die übrigen angewandten Methoden indem es die Daten der klassischen chemischen Analysen präzisiert und es ermöglicht, das Verhalten bei Langzeitversuchen vorherzusehen.

РЕЗЮМЕ

Новые заметки об оценке плодородия окультуренных почв, при помощи опытов в небольших вегетационных сосудах.

ЛЕМЕР. Ф.

Предлагается некоторое изменение технологии опытов в небольших вегетационных сосудах (Шаминад 1964), предназначенных для изучения минеральных запасов окультуренных почв. Изменение это улучшает возможности данной методики в почвах со слабой емкостью обмена и в почвах относительно богатых.

Приводятся также примеры применения этой технологии, оьлегчающие выбор полей для долгосрочных опытов, в зависимости от преследуемых целей, определение послледствий применения минеральных удобрений и действие вынесения элементов питания культурами на ми ералъные запасы почвы на месте, даже по истечении очень короткого срока.

Технология эта дополняет другие применяющиеся методы, уточняет данные классических химических анализов и позволяет прогноз поведения культур в долгосрочных полевых опытах.

Références bibliographiques

ARAOS F., 1967. Estudio de déficiencias nutritivas en muestras superficiales de suelos de Nuble. *Agric. tec.*, **27**, 15-20.

BHAT K. K. S., 1970. *Contribution à l'étude de la dynamique du phosphore dans les sols tropicaux et de ses conséquences sur l'alimentation phosphorique des végétaux.* Thèse Paris, 121 p.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1963. Appréciation détaillée du niveau phosphorique des sols par des techniques chimiques simples. *C. R. Acad. Agric.*, **49**, 348-355.

BLANCHET R., FIORAMONTI S., 1968. Problèmes actuels de la fumure phosphatée vus à travers quelques exploitations de la région toulousaine. *C. R. Acad. Agric.*, **54**, 1064-1071.

BOUYER S., 1971. Etudes sur la fertilisation phosphatée des sols en Afrique tropicale et à Madagascar. *Phosphore Agric.*, **67**, 1-12.

BRICHETEAU J., FOURBET J. F., HUET Ph., 1971. *Etude de l'effet du carencement d'un sol en P et K : cultures en vases de végétation.* Rapport interne ENSA GRIGNON, 50 p.

CHAMINADE R., 1964. Etude des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Sci. Sol*, 2, 157-167.

CHAMINADE R., 1965. Bilan de 3 années d'expérimentation en petits vases de végétation. Mise au point technique. Résultats. *Agron. trop.*, XX, 1101-1162.

CHAMINADE R., LANGLET A., LEMAIRE F., 1971. Contrôle en vases de végétation du niveau de fertilité du sol. Essais réalisés sur des échantillons provenant des parcelles d'un champ d'expériences de longue durée. *C. R. Acad. Agric.*, **57**, 39-45.

CONCARET J., 1972. Carences en soufre. Conditions de leur apparition en Europe continentale. *Symposium international sur le soufre en agriculture. Ann. agron.*, n° hors série, 341-347.

DEMOLON A., BOISCHOT P., LAJON J., 1953. Réaction des divers sols à l'apport d'engrais phosphatés solubles, son importance dans l'établissement des fumures. *Ann. agron.*, 4, 291-300.

FRITZ J., 1974. Recherches des carences minérales des sols de la Réunion en vases de végétation. *C. R. Acad. Agric.*, **60**, 1010-1016.

GACHON L., 1966. Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1108-1116.

KILLIAN J., VELLY J., 1964. Diagnostic des carences minérales en vases de végétation sur quelques sols de Madagascar. *Agron. trop.*, 5, 413-443.

KOVACS K., PECZNIK J., 1972. Quelques relations de la nutrition végétale dans les essais en petits vases de végétation pour la fertilisation du sol. In « *Le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées* ». 3e *colloque européen et méditerranéen*, Budapest, Vol. I-II, 101-114.

KUTE J., BLANCHET R., BOSC M., 1967. Influence d'une paille en cours d'humification sur la dynamique du phosphore dans le sol et l'alimentation phosphorique des plantes. II. Alimentation des plantes. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 1330-1336.

MATEV J., 1974. Au sujet de la possibilité d'étudier la carence du sol en azote, phosphore et potassium au moyen de bio-tests de ray-grass (*Lolium multiflorum, Lam.*). *Potshvozn. Agrokhim.*, 9, 104-108.

SCHENKEL G., 1971. Evaluacion de la fertilidad de un suelo, mediante la produccion de materia seca en ensayos de macetas. I. representaciones graficas usadas. II. diagrama de fertilidad. *Turrialba*, 21, 253-271.

Ann. agron., 1977, **28** (4), 445-461.

Note Analytique

Comparaison de quelques méthodes d'évaluation au laboratoire de la capacité au champ

J. CHIAVERINI et R. GRAS *

avec la collaboration technique de J. P. TOURNIER *

Laboratoire de Botanique,
Faculté des Sciences, Parc Valrose,
06034 *Nice Cedex*
* *Station d'agronomie et de Physiologie végétale, I. N. R. A.,*
45, *boulevard du Cap*
06602 *Antibes*

Résumé

La capacité au champ de deux lots de sol, les uns basiques, les autres acides, a été évaluée en laboratoire à l'aide de diverses méthodes utilisant des mesures d'humidité à différents pF ou la granulométrie.

La comparaison de ces procédés d'évaluation montre que deux d'entre eux seulement donnent des résultats semblables.

Ainsi ces techniques de laboratoire, valables en toute rigueur pour les populations de sols dont proviennent les échantillons utilisés pour leur mise au point, peuvent s'employer seulement pour des recherches ne nécessitant pas une grande précision.

Introduction

Bétrémieux (1975) signale que la notion de capacité au champ est un sujet constant de controverse. Comme ses partisans et ses détracteurs se placent à des points de vue différents, on peut tenter de les analyser succinctement.

Pour le physicien, l'humidité du sol ne peut demeurer constante que si le gradient de potentiel moteur de l'eau est nul, c'est-à-dire si tout point de la zone considérée présente un potentiel total constant. Ce potentiel total est égal à la somme du potentiel matriciel et du potentiel gravifique dans la période de drainage qui suit la saturation. L'invariance du potentiel impose une loi stricte de variation du potentiel matriciel en fonction de la profondeur. Comme le signalent Baver *et al.* (1972), les profils expérimentaux de potentiel correspondent rarement aux profils de potentiel théorique impliqués par la relation ci-dessus. Il est donc exceptionnel de se trouver dans des conditions où l'équilibre peut être atteint.

C'est un fait d'observation courante, cependant, que le sol retient de l'eau. Après

une humectation avec excès, et une fois un certain délai écoulé, l'humidité varie généralement peu avec le temps au point que l'on soit tenté d'utiliser des termes tels que « humidité constante », « valeur à l'équilibre », etc...

L'intérêt pragmatique d'un tel pseudo équilibre est indéniable, tant pour l'agronome que pour l'ingénieur des travaux publics, même s'il est contesté à juste titre du point de vue de la physique. C'est l'importance technique de cette notion qui a conduit à la conserver malgré une certaine ambiguïté et à définir des procédés de mesures, sinon d'évaluation.

Il va de soi que postuler l'existence d'un équilibre nécessite de proposer une méthode de mesure qui, d'après le terme même de capacité au champ, doit se faire au champ. La mesure d'humidité effectuée un temps déterminé après la saturation du profil, 48 heures par exemple, est abandonnée. Il est préférable de construire la courbe humidité-temps. Pour les uns, la capacité au champ est l'humidité séparant les phases de drainage rapide et de drainage lent, ce qui suppose que cette courbe présente un changement de pente net ; ce n'est pas toujours le cas et ainsi certains sols ne possèdent pas de capacité au champ (Russel, 1961). D'autres auteurs, tel Marcesse (1967) proposent diverses procédures utilisant également la courbe humidité-temps.

Devant les difficultés de réalisation des mesures au champ, qui en outre ne sont pas normalisées, on est conduit non à mesurer au laboratoire la capacité au champ, ce qui par sa définition même n'aurait guère de sens, mais à retrouver sa valeur par une technique appropriée. Il faut noter qu'au laboratoire on considère la terre en général remaniée, alors qu'au champ on se réfère à l'horizon placé au sein d'un profil. Or on sait que le drainage d'un horizon donné n'est pas le même selon la texture de l'horizon sous-jacent, ainsi que le laissaient entendre Veihmeyer et Hendrickson (1949) : « La capacité au champ est la quantité d'eau retenue dans le sol après que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas ait été pratiquement réduit, ce qui prend habituellement deux à trois jours après une pluie ou une irrigation dans des *sols perméables de texture et de structure uniforme*. »

De nombreuses méthodes d'estimation de la capacité au champ au laboratoire ont été proposées.

La mesure de l'humidité équivalente après centrifugation d'un échantillon de 1 cm d'épaisseur à 1 000 g (g = accélération de la pesanteur), fournit d'après Veihmeyer et Hendrickson (1949) une bonne estimation de la capacité au champ pour les sols à texture fine, mais non pour les sols sableux, leur rétention étant très sous-estimée.

La détermination de l'humidité d'un échantillon de sol, préalablement saturé, en équilibre avec une pression donnée, a été employé par de nombreux auteurs. La valeur de la pression étant le plus souvent de 1/3 d'atm : Peters (1965), De Leenheer (1967), mais aussi plus faible, de 1/5 à 1/20 d'atm : Salter (1961), Gradwel (1968), Mac Leaw et Yager (1970), Rivers et Shipp (1971).

De façon générale, la pression à exercer varie considérablement avec la nature du sol, elle doit être d'autant plus faible que la texture devient plus sableuse (Bonneau, 1961).

Reconnaissant l'impossibilité de trouver un pF unique de ressuyage, d'autres auteurs abordent le problème de façon différente :

Féodoroff et Bétrémieux (1964) ont mis au point une méthode dynamique consistant à étudier la vitesse de dessèchement d'un sol saturé placé sur un sol sec; ils simulent ainsi au laboratoire, avec des échantillons remaniés, les phénomènes qui se passent

au champ. Satisfaisante du point de vue des principes, cette méthode est longue et demande beaucoup de terre.

Gras (1962), montre l'existence, pour des échantillons remaniés, prélevés dans la moitié nord de la France, d'une liaison linéaire significative au seuil de 1 p. 100 entre l'humidité à pF 3 et le pF à appliquer pour obtenir la capacité au champ (fig. 1*a*) : pF de ressuyage = 1,75 + 0,034 humidité à pF 3 p. 100. Cette relation permet d'obtenir la capacité au champ (que nous noterons CCG) par l'intermédiaire de la courbe de rétention de l'eau (fig. 1*b*). La régression employée est celle de Gras (1962) modifiée (non publiée). Elle a été établie à l'aide de valeurs de la capacité au champ déter-

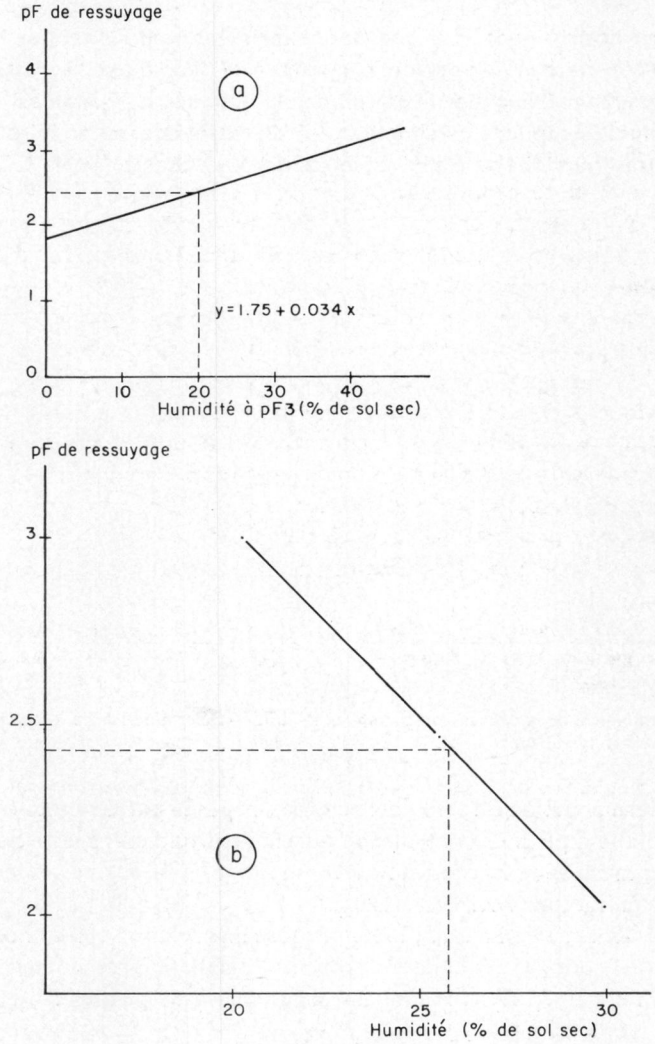


FIG. 1. — *Détermination de la capacité au champ par la méthode de Gras.*

a) Détermination du pF de ressuyage à partir de l'humidité à pF 3.

b) Détermination de la capacité au champ à partir de la courbe de rétention et du pF de ressuyage.

minée par l'humidité séparant les phases de drainage lent et rapide consécutives à un arrosage important pour un groupe de sol et les humidités au printemps pour un autre groupe de sol.

Cavazza *et al.* (1973) établissent pour des sols remaniés prélevés dans le Sud de l'Italie (Les Pouilles) différentes équations de régression entre l'humidité retenue à des succions de 0,1 à 0,3 atm, et la capacité au champ, cette dernière étant déterminée *in situ* vraisemblablement par la recherche d'un palier de la courbe de variation d'humidité. Ils obtiennent la meilleure évaluation (fig. 2) que nous noterons CCC, en introduisant l'humidité x_1 à 0,1 atm dans l'équation :

$$CCC = 4{,}40 + 0{,}69\ x_1 .$$

Toutes les caractéristiques hydriques sont exprimées en pour cent de terre sèche.

Dancette et Maertens (1974) partant comme Gras (1962) d'une régression linéaire entre le pF de ressuyage à la capacité au champ et l'humidité à pF 3, puis d'une régression linéaire reliant la capacité au champ au pF de ressuyage, en déduisent une relation linéaire entre l'humidité x_2 à pF 3 et la capacité au champ (notée CCD, fig. 3) :

$$CCD = 12 + 0{,}50\ x_2 .$$

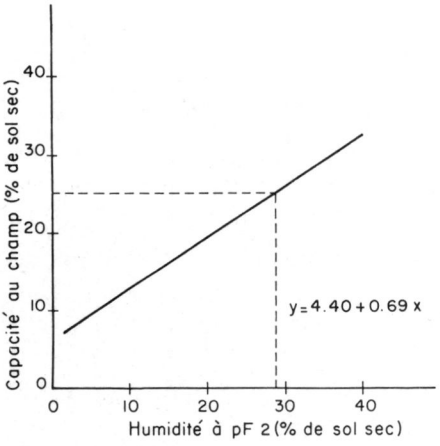


FIG. 2. — *Détermination de la capacité au champ par la méthode de Cavazza* et al.

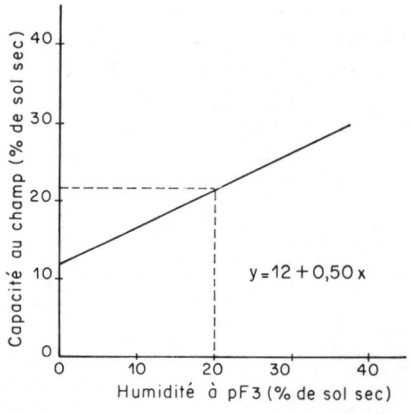


FIG. 3. — *Détermination de la capacité au champ par la méthode de Dancette et Maertens.*

Cette dernière équation est semblable à celle proposée par Cavazza *et al.*, établie, elle, pour l'humidité à pF 2. Ceci montre la parenté existant entre les trois méthodes. La technique de mesure de la capacité au champ employée par ces auteurs est sans doute celle préconisée par Marcesse (1967).

Enfin, Gras (1957, in Hénin *et al.*, 1960) propose une relation entre l'humidité équivalente déterminée par la méthode Bouyoucos (HEG), la granulométrie (argile : A p. 100, limon fin : L p. 100) et la matière organique (MO p. 100) :

$$HEG = 0{,}59\ A + 0{,}16\ L + 5{,}47 ;$$

si MO > 1 p. 100 on ajoute

$$\Delta H = 0{,}75\ (MO - 1) + 0{,}93 .$$

Cette relation présente un intérêt pratique, car elle donne rapidement une approximation de la capacité au champ.

Nous nous proposons de comparer les trois méthodes d'évaluation de la capacité au champ utilisant une ou plusieurs valeurs d'humidité à des pF fixés : Cavazza *et al.*, Dancette et Maertens, Gras. De plus nous comparerons les évaluations de la capacité au champ et de l'humidité équivalente proposées par Gras.

Nous utiliserons comme critère la cohérence des résultats de ces méthodes entre eux, car nous ne disposons, pour des raisons évidentes de temps et de matériel, ni des valeurs de la capacité au champ mesurée *in situ*, ni même des valeurs données par la méthode de Féodoroff et Bétremieux qui simule les phénomènes se produisant au champ.

Matériel

Nous utilisons deux lots de sols :

— Sols basiques prélevés dans les lavanderaies du Sud-Est de la France, dont le pH eau est supérieur à 7 ; seul un petit nombre de ces sols ne contient pas de quantité dosable de carbonates. Ils ont fait l'objet d'un travail antérieur (Chiaverini, 1976). n = 144 échantillons.

— Sols acides prélevés soit dans des lavanderaies, soit dans des maquis des Alpes maritimes (Roquefort les Pins) ou du Var (Estérel). Le nombre restreint (n = 18) de ces échantillons ne permet d'obtenir qu'une indication sur les différences entre les méthodes.

Les principales caractéristiques de ces sols sont données dans le triangle de texture (fig. 4) et dans le tableau ci-après :

	MO			$CaCO_3$		
	mini.	maxi.	moy.	mini.	maxi.	moy.
Sols basiques	0,5 p. 100	7,4 p. 100	2,2 p. 100	0,0 p. 100	74,0 p. 100	28,6 p. 100
Sols acides.....	0,6 p. 100	8,5 p. 100	3,2 p. 100	0	0	0

Les paramètres nécessaires pour les calculs ont été déterminés ainsi :

Les fractions 0-2 μ et 2-20 μ proviennent d'une analyse granulométrique sans décalcification pour les sols basiques et avec décalcification pour les sols acides.

La matière organique a été obtenue à partir du carbone (Anne, 1965) par multiplication par 1,72.

Les mesures d'humidité à pF 2-2,5-3 ont été effectuées par ressuyage de terre tamisée à 2 mm dans un extracteur à basse pression.

Enfin l'humidité équivalente a été mesurée par la méthode Bouyoucos de ressuyage sous vide.

Les valeurs d'humidité aux différents pF présentent des variations parfois importantes que nous avons cherché à évaluer en faisant des répétitions sur des échantillons pris au hasard. Les moyennes, écarts types et coefficients de variation tirés de ces

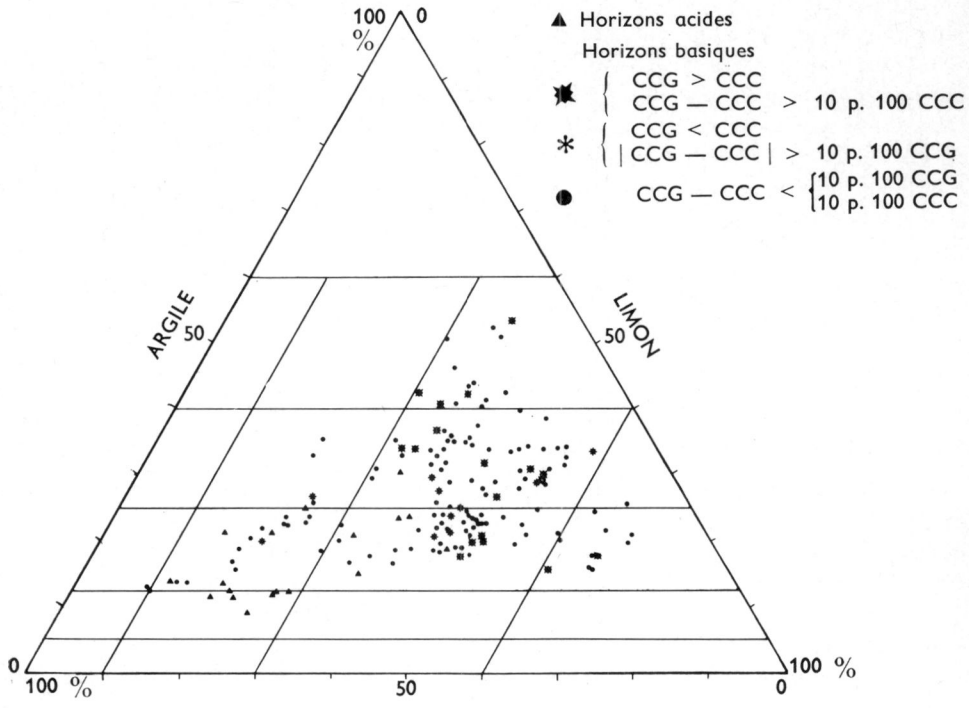


FIG. 4. — *Triangle de texture des échantillons utilisés.*

résultats sont résumés par les histogrammes des coefficients de variation (fig. 5). Ils montrent que la reproductibilité des mesures est meilleure lorsqu'on s'élève dans l'échelle des pF.

Etude statistique

Cette comparaison concerne les méthodes telles qu'elles ont été proposées par les différents auteurs ; une analyse critique des conditions d'obtention de la capacité au champ *in situ* serait hautement souhaitable, car c'est par rapport à ces mesures que les méthodes ont été établies. Malheureusement, ces conditions ne sont pas suffisamment précisées par tous les auteurs pour donner lieu à une analyse utilisable.

Nous avons opéré de quatre façons pour effectuer les comparaisons : deux sont globales et les deux autres, les plus utiles à notre avis, considèrent les mesures individuelles pour chaque sol.

1. — *Corrélations entre les mesures*

Données dans le tableau ci-dessous, elles sont toutes significatives à 1 p. 1 000, mais leur carré (r^2) traduit seulement un taux d'explication moyen compris entre 30 p. 100 et 87 p. 100. Il faut noter que la corrélation entre CCC et CCD correspond à la corrélation entre les humidités à pF 2 et pF 3.

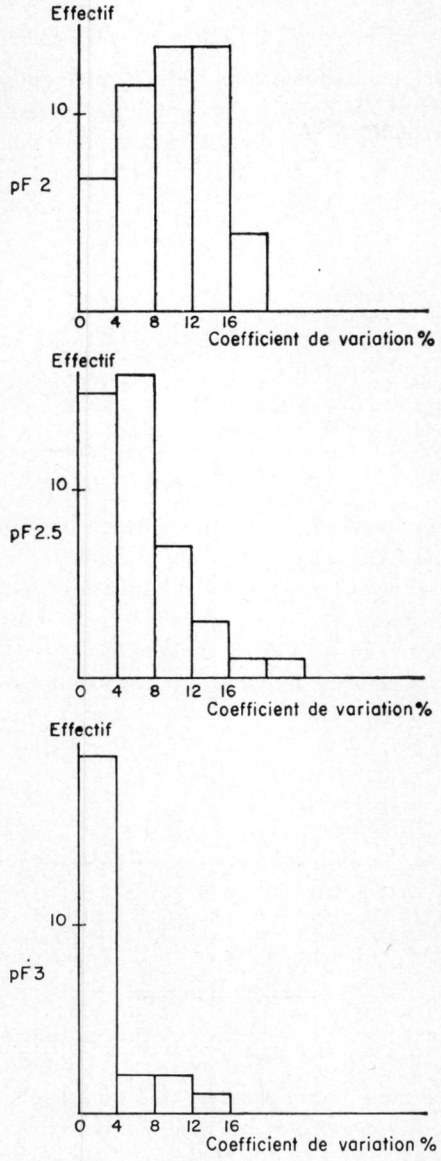


FIG. 5. — *Histogrammes des coefficients de variation des mesures d'humidité à différents pF.*

		CCG-CCC	CCG-CCD	CCC-CCD	CCG-HEG
Sols basiques	r	0,78	0,84	0,79	0,55
	r^2	0,61	0,71	0,62	0,30
Sols acides	r	0,93	0,89	0,90	0,73
	r^2	0,86	0,79	0,81	0,53

2. — *Comparaison des méthodes 2 à 2 par appariement*

La méthode d'appariement (Vessereau, 1948) est bien adaptée à notre cas, car elle permet d'éliminer la variabilité entre les échantillons. Le test t de Student permet de savoir si les différences peuvent être considérées comme nulles aux erreurs d'expérience près.

Sols basiques : n = 144

	Moyenne des différences	t	Seuil	Ecart mini	Ecart maxi
CCG-CCC	0,35 p. 100	2,33	2 p. 100	— 6 p. 100	4 p. 100
CCC-CCD	3,17 p. 100	22,19	1 p. 1 000	0 p. 100	10 p. 100
CCG-CCD	3,53 p. 100	28,16	1 p. 1 000	0 p. 100	8 p. 100
CCG-HEG	— 2,32 p. 100	6,07	1 p. 1 000	— 15 p. 100	9 p. 100

Toutes les différences moyennes sont significatives à des seuils inférieurs à 5 p. 100, mais pour le couple CCG-CCC seulement, elles sont inférieures à l'ordre de grandeur de l'erreur absolue moyenne sur une mesure d'humidité.

L'amplitude des écarts est à peu près la même pour tous les couples, sauf pour CCG-HEG où elle atteint 23 p. 100 d'humidité.

Enfin, ces écarts sont centrés sur la valeur zéro seulement pour CCG-CCC.

Sols acides : n = 18

	Moyenne des différences	t	Seuil	Ecart mini	Ecart maxi
CCG-CCC.....	0,05 p. 100	0,24		2 p. 100	1 p. 100
CCC-CCD.....	2,45 p. 100	3,86	1 p. 100	0 p. 100	10 p. 100
CCG-CCD.....	2,50 p. 100	4,68	1 p. 1 000	0 p. 100	8 p. 100
CCG-HEG	2,37 p. 100	3,41	1 p. 100	2 p. 100	8 p. 100

Pour ce dernier ensemble de sols, les différences sont également significatives sauf pour la différence CCG-CCC ; nous remarquons également, que la moyenne des écarts CCG-HEG est maintenant positive, cela est dû sans doute aux répartitions granulométriques très différentes entre sols acides et basiques.

3. — *Comparaison graphique entre les mesures*

On porte les évaluations de la capacité au champ obtenues par une méthode en abscisse, puis celles obtenues par une méthode différente en ordonnée. La position de chaque point par rapport à la première bissectrice donne une idée de la concordance des mesures.

Pour les sols basiques et acides, nous observons ceci :

CCG-CCC (fig. 6*a* et 6*b*) : les points se groupent autour de la première bissectrice. Les écarts deviennent d'autant plus importants que la capacité au champ est plus élevée.

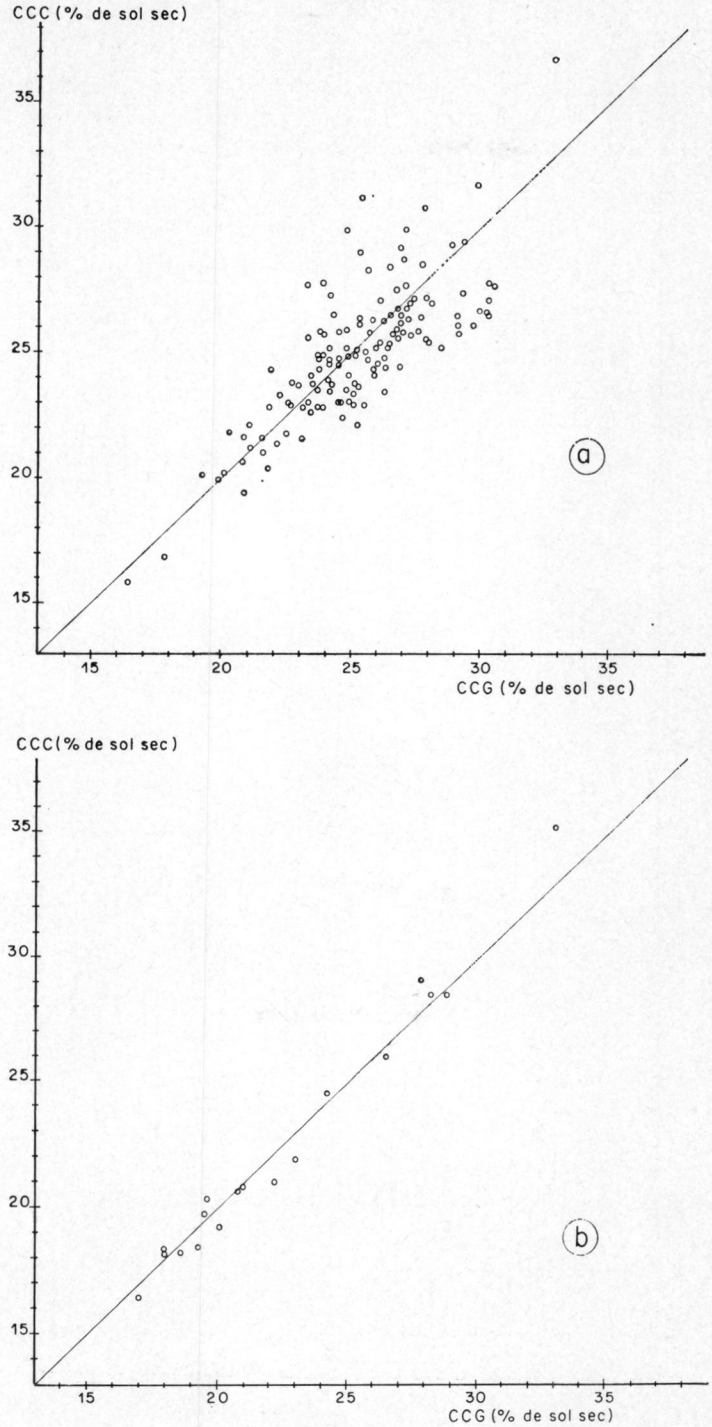
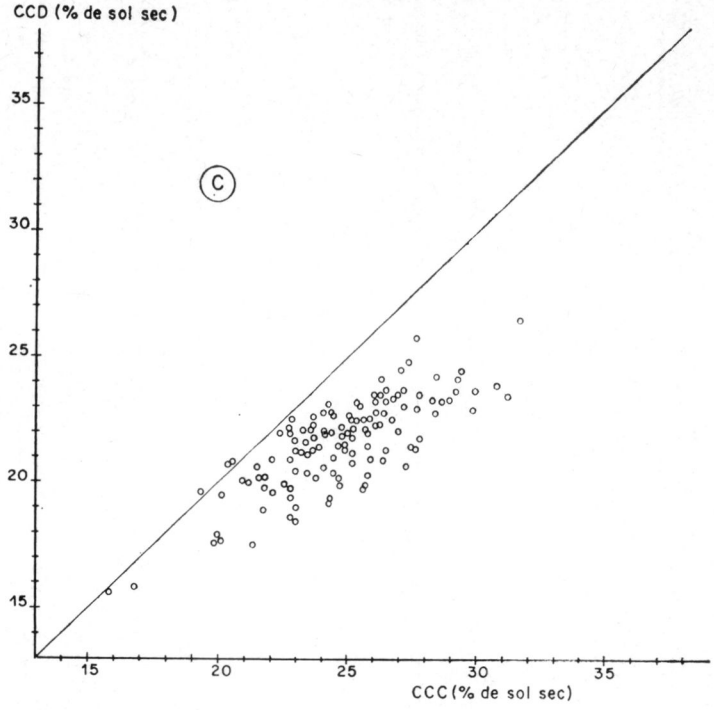
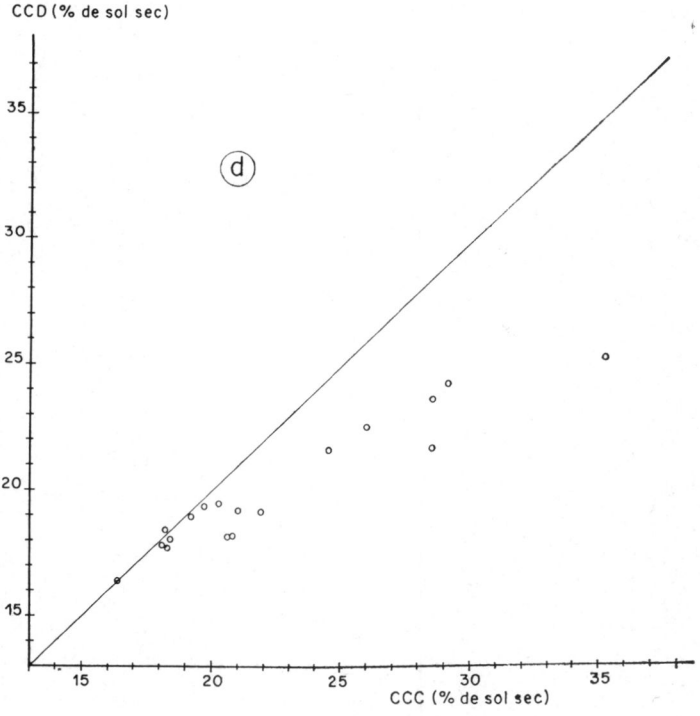


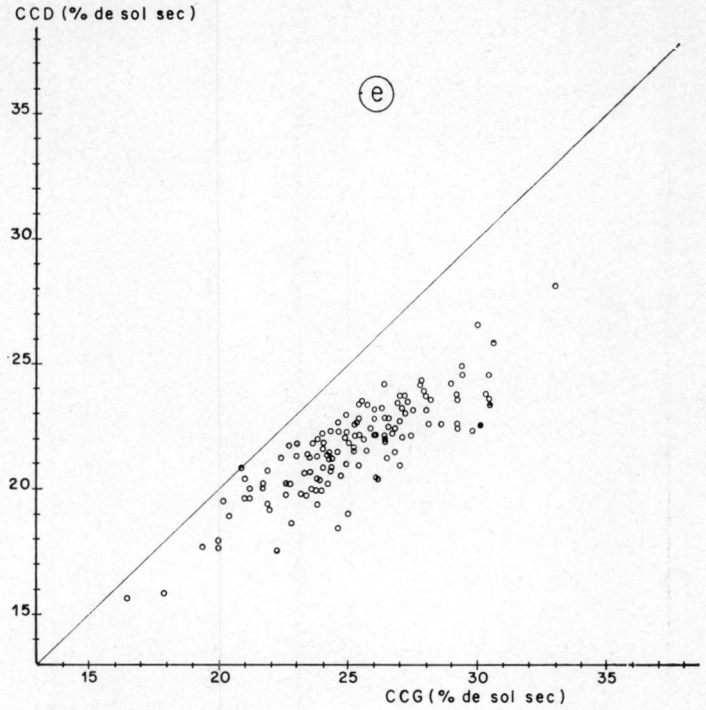
FIG. 6. — *Diagrammes de dispersions* :

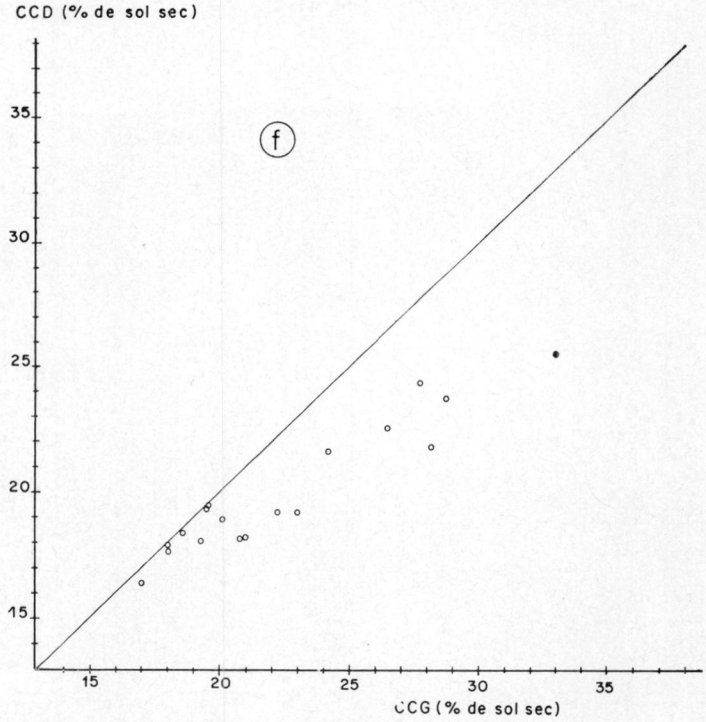
CCG — CCC { sols basiques (*a*) / sols acides (*b*)



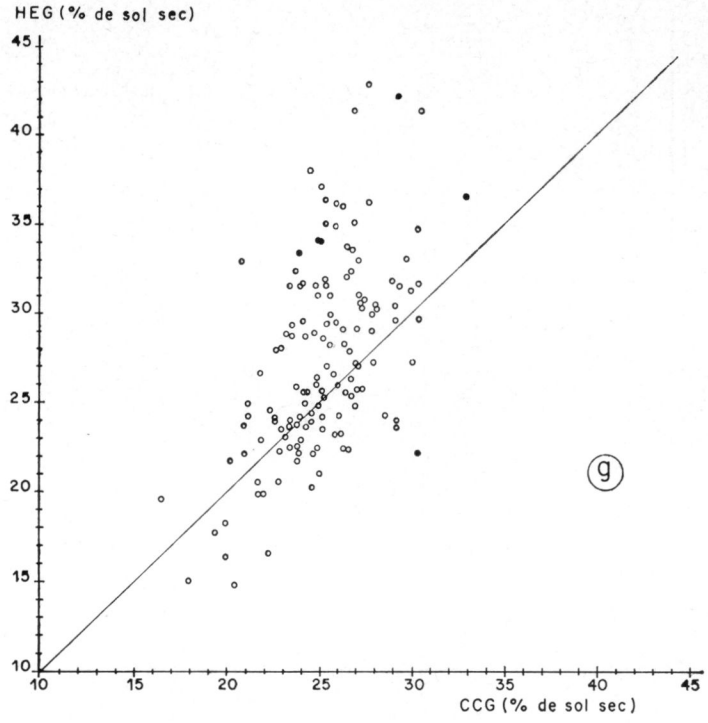


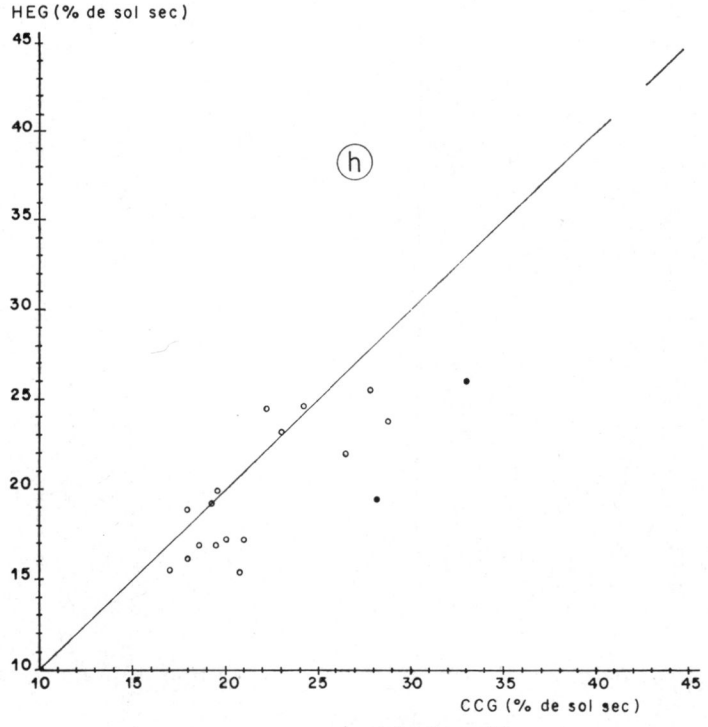
CCC — CCD { sols basiques (c) / sols acides (d)





CCG — CCD { sols basiques (e) / sols acides (f)





CCG — HEG { sols basiques (*g*) / sols acides (*h*)

CCC-CCD (fig. 6*c* et 6*d*) et CCG-CCD (fig. 6e et 6*f*) : dans les deux cas les points se rassemblent en dessous de la première bissectrice de façon tout à fait semblable, une certaine correspondance apparaît entre ces méthodes pour les faibles valeurs de la capacité au champ.

Pour CCG-HEG (fig. 6*g* et 6*h*) : le désaccord entre les méthodes est assez important et varie selon la réaction des sols. Les différences entre les valeurs proviennent du fait que ce sont des évaluations de la capacité au champ et de l'humidité équivalente qui sont comparées.

4. — *Histogrammes des différences entre les mesures*

Ils sont commentés pour les sols basiques seulement, les histogrammes des sols acides étant trop différents de ceux d'une distribution normale, à cause vraisemblablement de l'effectif réduit.

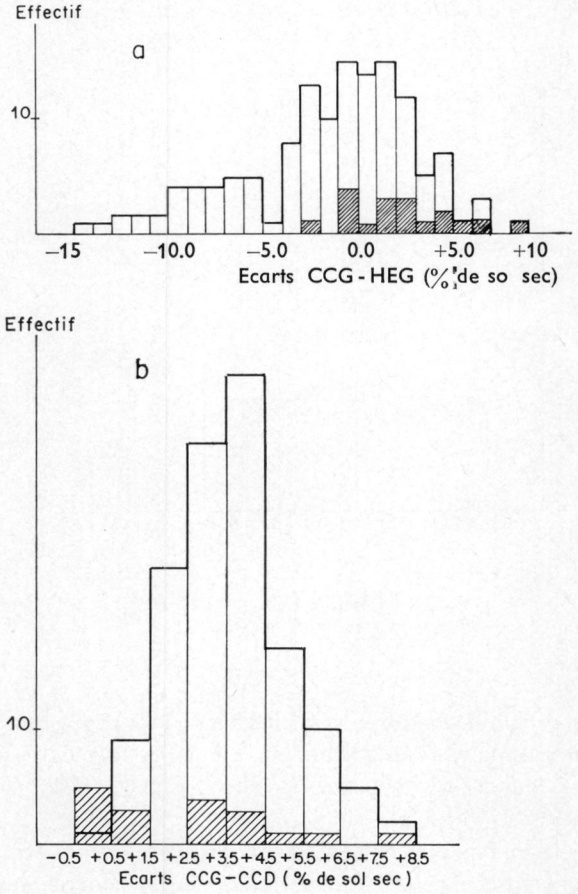
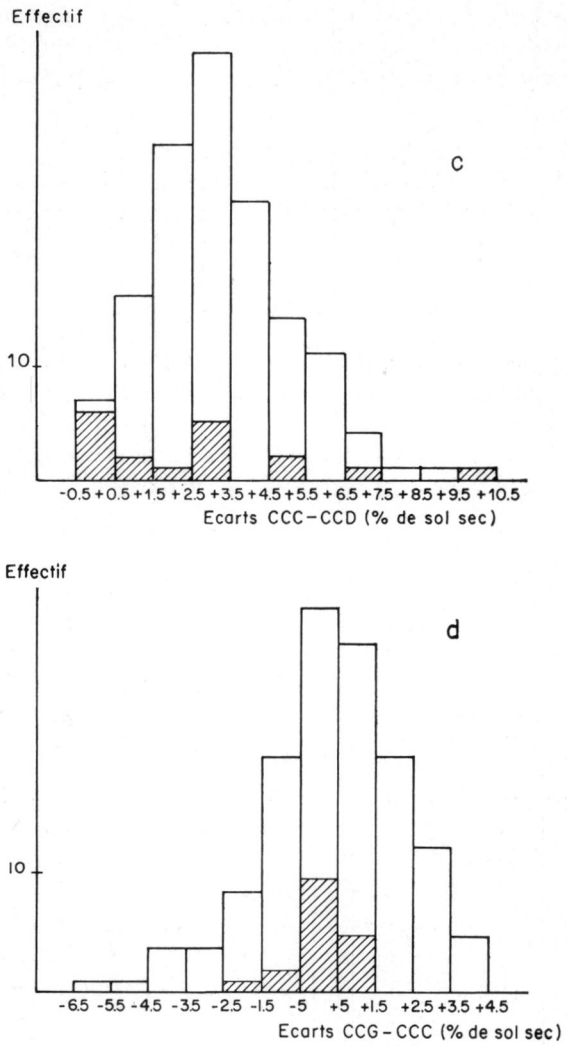


FIG. 7. — *Histogrammes des écarts (les sols acides correspondent aux histogrammes en grisé).*

a écarts CCG — HEG
b écarts CCG — CCD



c écarts CCC — CCD
d écarts CCG — CCC

Pour chaque couple de mesures, les différences sont regroupées en classes pour construire un histogramme de répartition, qui donne une idée des risques pris en utilisant une méthode à la place d'une autre. On retrouve sur ces histogrammes les constatations précédentes.

Excepté pour les différences entre CCG et HEG (fig. 7*a*), les écarts sont distribués de façon sensiblement normale et la classe modale des histogrammes se confond avec la classe contenant la moyenne. La position de cette dernière, par rapport à zéro, indique la présence d'un écart systématique entre les mesures pour CCG-CCD (fig. 7*b*) et CCC-CCD (fig. 7*c*) et une meilleure concordance pour CCG-CCC (fig. 7*d*). Dans ce

dernier cas il est intéressant de situer le risque pris en utilisant une méthode à la place d'une autre :

On considère la probabilité d'un écart donné exprimé en pourcentage de la valeur la plus faible (ce qui donne la valeur la plus pessimiste de l'écart). Ainsi la probabilité d'obtenir un écart supérieur à 10 p. 100 de la valeur la plus faible est de 19 p. 100. Un écart de 10 p. 100 revient à passer pour la moyenne par exemple de 25 à 27,5 p. 100. Ces écarts importants ne correspondent pas à des sols de texture particulière (fig. 4).

Conclusion

Pour un ensemble de sols basiques du Sud-Est de la France, les évaluations au laboratoire de la capacité au champ par trois méthodes sont différentes à des degrés divers suivant les couples de méthodes considérées.

Ce sont les méthodes de Cavazza et de Gras qui donnent les résultats les plus concordants (différence moyenne de 0,35 p. 100 d'humidité), mais même dans ce cas, la probabilité pour que l'écart entre les mesures dépasse 10 p. 100 de la valeur la plus faible, atteint presque 0,20.

Les résultats obtenus par la méthode de Dancette et Maertens sont plus faibles que ceux des deux autres (différence moyenne 3,1 et 3,5 p. 100 d'humidité).

Il est difficile d'interpréter ces constatations, la texture des échantillons de sols utilisés pour l'établissement des différentes méthodes, le procédé de détermination de la capacité au champ *in situ* pourraient intervenir. Il est également vraisemblable que ces méthodes ne peuvent être utilisées en toute rigueur que pour la population de sol dont est issu l'échantillon utilisé pour leurs mises au point.

La comparaison de l'évaluation Gras de la capacité au champ et de l'évaluation de l'humidité équivalente par la granulométrie et la matière organique fait apparaître une différence moyenne un peu inférieure aux différences moyennes précédentes (2,3 p. 100), les écarts maxima étant cependant très élevés.

D'une façon générale, les écarts entre les méthodes augmentent avec la valeur de la capacité au champ.

Comme on pouvait s'y attendre, les méthodes de laboratoire ne fournissent que des évaluations présentant entre elles des différences plus ou moins grandes. Les études précédentes donnent des indications sur les erreurs attachées à de telles évaluations. On ne doit donc les utiliser que lorsqu'on ne désire pas une précision élevée, compte tenu du problème que l'on étudie. Elles présentent cependant l'avantage d'être plus facilement réalisables que les méthodes *in situ* qui, comme nous l'avons vu, ne sont également pas à l'abri de toute critique.

Reçu pour publication en juillet 1977.

Summary

Comparison of several methods of field capacity evaluation in laboratory

The field capacity of two kinds of soil parcels, the ones basic, the others acid was evaluated in laboratory by the aid of different methods using humidity measurements at different pF or particle size distribution.

The comparison of these evaluation methods shows that only two among them give similar results.

So, these laboratory techniques are strictly valid only for the soil populations from which the samples were taken for the tests.

They can only be used for studies which do not need a great precision.

Zusammenfassung

Vergleich einiger Laboratoriumsmethoden des Wasserkapazitätsmessurgen

Der Wasserkapazität zweier Bodenarten, die eine basisch und die andere sauer, wurde im Laboratorium mit verschiedenen Methoden gemessen, die aus Feuchtigkeitsmessungen bei unterschiedlichem pF oder der Granulometrie bestanden.

Der Vergleich dieser Berechnungsverfahren zeigt, dass nur zwei davon ähnliche Ergebnisse liefern.

Diese auf ihr Zutreffen getesteten Laboratoriumtechniken sind nur für die hier untersuchten Bodenproben voll gültig and können nur für Forschungen, die keine hohe Genauigkeit verlangen, eingesetzt werden.

РЕЗЮМЕ

Анапитическая Заметка

Сравнительное изучение нескольких методов лабораторного определения полевой влагоемкости.

КИАВЕРИНИ Ж., ГРА Р.

Полевая влагоемкость образцов почв с двух участков-одного со щелочной, другого с кислой реакцией, определялась в лаборатории с помощью различных методов измерения влажности, при разных PF и гранулометрии.

Сравнение этих методов определения показало что только два из них дают одинаковые результаты.

Значит, эти технические лабораторные приемы приемлемы только для популяций почв образцов служивших для разработки этих приемов, и что применение их возможно только в случаях исследований не требующих большой точности.

Références bibliographiques

ANNE, P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, Série A, 16.

BAVER, L. D., GARDNER, W. H., GARDNER W. R., 1972. *Soil physics*. John Wiley & Sons, New York, 498 p.

BÉTREMIEUX, R., 1975. Réflexions à propos de la capacité au champ et de sa mesure, actualisation et réhabilitation de cette notion. *Publ. Inst. Nat. Rech. Agron., Département de Science du sol*, 41 p. multigr.

BONNEAU M., 1961. Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, n° spéc., 16-26.

CAVAZZA L., COMEGNA V., LINSALATA D., 1973. Correlation of field capacity between open field and laboratory determinations. In : A. Hadas *et al.*, *Physical aspects of soil water and salts in Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, p. 187-193.

CHIAVERINI J., 1976. *Recherches sur les sols calcaires des lavanderaies du Sud-Est de la France. Liaisons entre quelques paramètres physiques et chimiques*. Th. Doct. 3e cycle, spéc. Biol. vég., 127 p.

DANCETTE C., MAERTENS C., 1974. Méthode d'estimation de la capacité au champ pour l'eau à partir de pF 3. *Sci. du Sol* (3), 165-171.

FÉODOROFF A., BÉTREMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Sci. du Sol* (2), 109-118.

GRADWELL M. W., 1968. The moisture holding properties of Waïkato soils and methods of their determination. *New Zeal. J. agric. Res.*, **9**, 127-136.

GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône, entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural*. Société d'Editions des Ingénieurs Agricoles, Paris, 320 p.

LEENHER L. de, 1967. Considérations critiques sur la valeur des résultats de la détermination de la porosité totale et de la distribution des pores du sol. *Pédologie*, **17** (2), 123-152.

MACLEAN, A. H,, YAGER, T. U., 1972. Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size analysis. *Soil Sci.*, **113** (1), 23-29.

MARCESSE J., 1967. Determination *in situ* de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons. *Colloque AIEA*, Istamboul.

PETERS D. B., 1965. Water avaibility. In : C. A. Black, *Methods of soil analysis*. Amer. Soc. Agron. Madison (Wis.), 279-285.

RIVERS E. D., SHIPP R. F., 1972. Available water capacity of sandy and gravelly North Dakota soils. *Soil Sci.*, **113** (2), 74-80.

RUSSELL E. W., 1961. *Soil conditions and plant growth*. 9th ed. Longmang, London, 688 p.

SALTER P. J., HAWORTH F., 1961. The available-water capacity of a sandy loam soil. I. A critical comparaison of methods of determining the moisture content of soil at field capacity and at the permanent wilting percentage. *J. Soil Sci.*, **12** (2), 326-334.

VEIHMEYER F. J., HENDRICKSON A. H., 1949. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Sci.*, **68,** 75-95.

VESSEREAU A., 1948. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie*. t. 2, J. B. Baillière et fils, Paris, 381 p.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 PARIS. — 2-1978

Dépôt légal : 1er trimestre 1978. N° d'Impression : 24958

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1977

Vol. 28. N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

SÉMINAIRE

sur

« Les applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrogéologie »
Cadarache (1), 16-18 novembre 1976

Table des matières

I. — Exposés introductifs

1. — P. GUÉRIN de MONTGAREUIL. 463

2. — M. HALLAIRE. 467

3. — J. MARCESSE. 469

II. — Liste des communications (2) 476

III. — Articles de synthèse

PH. COUCHAT. — Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. 477

R. GUENNELON et B. CABIBEL. — Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle des réserves hydriques. 489

F. A. DAUDET et G. VACHAUD. — La mesure neutronique du stock d'eau du sol et ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. 503

(1) Service de Radioagronomie, Département de Biologie, CEN de Cadarache, CEA, B. P. 1, 13115 Saint-Paul-lez-Durance (France).

(2) Les communications paraîtront intégralement dans les premiers numéros du Bulletin édité par le « Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique ». Secrétariat: Grande Bastide - Bât. 177 — B. P. 31 — 13115 Saint-Paul-lez-Durance.

Ann. agron., 1977, **28** (5), 463-476.

I. — Exposés introductifs

1. — Exposé de P. Guérin de Montgareuil (1)

Je souhaite la bienvenue à Cadarache pour tous les participants au *Séminaire sur les applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrogéologie*. Je note qu'ils constituent un peu plus de la moitié des utilisateurs français opérant en métropole aussi bien qu'outre-mer, ce qui leur confère une bonne représentativité. Je remercie enfin M. Hallaire, chef du Département de Bioclimatologie de l'INRA, d'avoir bien voulu cautionner dans cette aventure, et introduire immédiatement à ma suite, tout le secteur agronomie qui va former le plat de résistance de nos réunions.

Je voudrais maintenant rappeler le scénario de la pièce que nous allons jouer ensemble pendant trois jours, pièce dont le décor sera pour l'essentiel constitué par la Salle de Conférences du Bâtiment Documentation du Centre de Cadarache, et dont les entractes serviront à de courtes visites organisées dans le Service de Radioagronomie, dans le Centre ou à l'extérieur en fonction d'une demande qui ne manquera pas de s'exprimer.

Au plan des *exposés*, le séminaire va comprendre trois parties bien distinctes qui couvriront, dans l'ordre d'importance décroissante et à peu près dans l'ordre chronologique, les aspects agronomiques, les aspects méthodologiques et quelques problèmes divers.

Un peu de temps a été réservé à des *tables rondes* pour lesquelles il y aura lieu de décider entre vous tout à la fois des sujets, des animateurs et des rapporteurs. Elles se tiendront le dernier jour et seront suivies d'une séance de synthèse et de discussions, à l'issue de laquelle sera abordé et peut-être réglé le problème de la mise en place — si besoin est — d'une structure que les uns appellent déjà « Club des utilisateurs de la sonde » et que d'autres préfèrent baptiser « Groupe français d'humidimétrie neutronique ». Vous êtes, ma foi, en mesure d'en décider souverainement. Ce sera la matière d'un débat que doit animer M. Couchat sur la base du document qui vous a été adressé en juillet dernier.

Ainsi prendra fin le séminaire 1976 sur les applications de la méthode neutronique, dont il est prévu que les communications paraîtront, sous une forme qui reste à définir, dans un numéro spécial des Annales de l'INRA.

La neutronoagronomie — faut-il le rappeler — est ce secteur de la radioagronomie où l'on se préoccupe de l'utilisation d'une variété particulière de neutrons, les neutrons de poche, dont la caractéristique est d'être aisément transportables et par suite de s'appliquer avec bonheur à la mesure in situ de l'humidité des sols. C'est un

(1) Chef du Service de Radioagronomie, Département de Biologie, CEN de Cadarache, Commissariat à l'Energie Atomique.

domaine où les utilisateurs commencent à acquérir l'autonomie nucléaire : il suffit pour s'en convaincre de comparer, pour ce qui est des programmes, le présent séminaire à celui qui s'était tenu à Cadarache il y a un peu plus de 9 ans, en avril 1967.

Il y avait à l'époque seize participants, dont six du CEA, avec quatorze communications dont la moitié traitait des aspects méthodologiques et surtout technologiques. Le rapport final notait en conclusion que la sonde à neutrons était considérée comme un outil attractif, simplement peut-être un peu trop coûteux.

Depuis lors se sont tenues sur le même sujet un certain nombre de réunions, notamment celles — toujours intéressantes — organisées sous les auspices du Ministère de l'Environnement (qui fut parfois celui de la Qualité de la Vie). Mais si aujourd'hui nous avons repris l'initiative c'est qu'il nous est apparu nécessaire, suite aux réflexions menées au sein du Groupe de Neutroagronomie fondé dans l'intervalle, de dresser le bilan des utilisations de la sonde et surtout de faire se rencontrer le maximum d'utilisateurs. Votre présence ici montre que cela correspondait à un besoin. Plus significative encore me paraît être la répartition des personnes (90 p. 100 d'entre vous sont extérieurs au CEA) et surtout des sujets dont la majorité se réfère à un problème agronomique. C'est dire par conséquent que M. Hallaire va prendre à sa charge la plus grande partie du travail d'introduction, alors que je me contenterai de vous proposer quelques réflexions sur les aspects méthodologiques, autrement dit le côté « neutrono » de l'affaire.

Ces réflexions vont porter successivement sur des questions d'appareillage, d'étalonnage et d'acquisition des résultats.

Appareillage.

Il n'y a guère de texte où l'auteur se préoccupe d'accroître les possibilités offertes par les appareils : une question par exemple qui n'est plus posée est celle qui correspondait à un souci d'amélioration du pouvoir de résolution. Encore moins trouve-t-on d'articles faisant état de pannes. Peut-être est-ce dû à l'abstention de ceux qui ont éprouvé des ennuis de ce genre, ce qui serait regrettable. Un échange de vues sur « Les malheurs de la sonde » pourrait en effet utilement trouver place dans un morceau de table ronde.

Pour ce qui concerne les types de sonde mis en œuvre, on constate une agréable diversité, qui témoigne de l'autonomie des utilisateurs. Je mets à profit cette occasion pour donner le point de vue du Service de Radioagronomie sur les appareils dont il a été amené à promouvoir l'emploi dans des secteurs qui nous paraissaient devoir constituer des créneaux.

La sonde Nemo est un outil de recherche particulièrement adapté à l'étude des cinétiques rapides, auxquelles nous nous sommes intéressés pendant un certain temps. Ce n'était pas un appareil de grande diffusion, ne serait-ce qu'en raison de son prix, conséquence d'une complexité peut-être excessive. Sa fabrication en est d'ailleurs arrêtée. Nous étudions en ce moment, à la demande du Délégué pour la Diversification, le moyen d'aboutir à un prototype de sonde automatique moins « sophistiqué ». Il ne verra le jour au plan industriel que s'il répond à une demande effective des utilisateurs.

La sonde Solo a été voulue dès le départ volontairement simplifiée, notamment au plan — essentiel selon nous — de la radioprotection. Une pré-série a été lancée, qui paraît avoir donné satisfaction à ses acheteurs. D'autres demandeurs s'inscrivent. Le CEA y répondra dans la mesure où il pourra trouver un industriel capable de proposer un produit fiable et relativement bon marché tout en assurant un service après vente correct. Des efforts sont en cours pour que tout cela débouche sur quelque chose de concret. Moyennant quoi le destin commercial de Solo — que bien évidemment nous souhaitons brillant — ne dépendra plus de nous et, à la limite, nous laissera, comme dit le poète, indifférents.

Etalonnage.

L'étalonnage des sols pour un type de sonde donné est apparemment un problème ouvert. Un certain nombre de papiers font état de la procédure classique, utilisée selon le cas comme référence ou pour comparaison. Cependant la plupart des auteurs considèrent que cette procédure est lourde et lui préfèrent ou souhaitent pouvoir lui substituer une méthode comme celle qui se fonde sur la mesure des constantes neutroniques du sol. Et c'est bien vrai que même si l'on peut mettre en cause l'exactitude de la relation établie entre d'une part ΣA et ΣD, sections efficaces macroscopiques d'absorption et de diffusion des neutrons au niveau thermique, d'autre part les coefficients de la droite d'étalonnage qui permet de passer du comptage neutronique à l'humidité volumique on peut difficilement nier le fait que pour des sols d'égale densité l'obtention de valeurs identiques pour ΣA et ΣD ne peut en aucun cas conduire, pour ce qui est de la droite d'étalonnage, à des résultats différents.

Les seules questions qui paraissent alors se poser sont :

— d'une part l'évolution des caractéristiques neutroniques pour un horizon donné et en fonction de la profondeur,

— d'autre part la détermination de la densité sèche.

En matière de constantes neutroniques l'exploitation des plages obtenues en reportant pour divers types de sol ΣA en fonction de ΣD peut conduire à une caractérisation neutronopédologique des sols assez féconde et il serait souhaitable qu'une table ronde puisse s'ouvrir sur ce thème.

Quant à la mesure *in situ* de la densité sèche c'est un problème qui ne paraît pas résolu d'une façon pleinement satisfaisante. Il est vrai que, sauf exception, la densité est un paramètre défini une fois pour toutes et que sa mesure se pose davantage en termes de prestations de service que d'acquisition d'appareillage. Les voies d'approche — je me limite ici aux méthodes nucléaires — font appel comme vous le savez au rayonnement gamma ou bien à la mesure du flux de neutrons au niveau épithermique. La deuxième voie a été bien explorée à Cadarache, mais j'ai le sentiment que nous ne sommes pas allés jusqu'au bout de notre effort. Reste à savoir si la curiosité des utilisateurs est suffisante pour en justifier la reprise. Sur ce point, comme sur beaucoup d'autres, la balle est dans le camp des agronomes.

Je voudrais pour conclure évoquer les tentatives d'étalonnage « intersondes » dont le succès autorise, à mon sens, les espoirs et les efforts placés dans l'application à tous les types de sonde de l'information ΣA, ΣD.

Acquisition des résultats.

S'interroger sur les modalités d'acquisition d'un résultat, c'est quelquefois faire œuvre de méthodologie, c'est plus souvent amorcer une interprétation. Il s'agit donc d'un domaine frontière que je vais évoquer avec prudence et brièveté.

On sait par exemple que l'hétérogénéité de répartition du stock d'eau est très grande en période d'irrigation et qu'elle diminue en période de dessication. Un problème associé est celui de la fréquence des mesures, et du même coup celui de leur mode d'acquisition : des partisans respectifs des tubages verticaux et des tubages horizontaux auront à en discuter. L'autre type bien connu d'hétérogénéité est celui que l'on rencontre à l'occasion des mesures de surface, pour lesquelles on verra que peut et doit se poser à nouveau le problème de l'étalonnage.

Pour bien cerner un phénomène il faut souvent recouper deux informations d'origine différente. D'où l'intérêt d'une association comme celle des humidimètres et des tensiomètres qu'il convient de décrire en termes de complémentarité plutôt que de concurrence. Il est en effet indispensable, pour qui veut connaître le destin d'un stock d'eau mis en évidence de façon quantitative dans un sol à partir de la méthode neutronique, de déterminer à l'aide de tensiomètres ce qu'on appelle le plan de flux nul, qui établit le partage entre ce qui remonte vers l'atmosphère et ce qui s'élimine vers la nappe. Mais les choses se compliquent dès qu'intervient une plante et en particulier, comme le montre très clairement un article du séminaire auquel je me réfère, lorsque les racines ont le mauvais goût de se développer au travers du plan de flux nul. Il semble alors qu'il faille inventer autre chose pour se tirer d'affaire, et peut-être penser au type d'information qu'apportent les traceurs spécifiques de l'eau : deutérium, tritium ou oxygène 18. Nous venons précisément de mettre au point une sonde γ,n susceptible de traduire *in situ* une teneur en deutérium en un flux de neutrons, en sorte que nous voilà ramenés à notre point de départ.

Ce sera ma conclusion, car le moment est venu pour M. Hallaire de nous donner son sentiment sur ce que représentent, en 1976, au vu des nombreux textes qui nous sont proposés, les apports à l'agronomie de la méthode neutronique.

2. — Exposé de M. Hallaire (1)

Ce séminaire consacré aux applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrologie portera d'abord sur l'instrument de mesure, ses diverses caractéristiques et les améliorations les plus récentes. Nous ne reviendrons pas sur cet aspect, largement évoqué par M. Guérin de Montgareuil.

J'insisterai par contre sur l'intérêt pour les utilisateurs rassemblés ici de pouvoir confronter leurs objectifs et d'examiner dans quelle mesure et sous quelle réserve la méthode neutronique est adaptée à leurs besoins.

Au vu de l'ensemble des communications, la sonde apparaît en fait actuellement et exclusivement comme un instrument de recherches. Il n'en reste pas moins qu'au plan opérationnel, elle semble appelée à servir d'instrument de contrôle, ainsi que le confirmeraient par exemple, les études menées dans le cadre de chantiers routiers et de périmètres irrigués.

Mais si l'on en revient aux problèmes qui s'inscrivent dans une perspective de recherche, l'ensemble des communications présentées dans ce séminaire montre la diversité des sujets susceptibles de faire appel à la mesure systématique et non destructrice de l'humidité du sol *in situ*.

Les tranches supérieures du sol jouent le rôle bien connu de *réservoir*, rôle dont il n'est guère utile de rappeler l'importance en agronomie ou en hydrologie, de même que l'intérêt du point de vue écophysiologique. Or les paramètres qui caractérisent ce réservoir et son fonctionnement — gamme d'humidité utile de chaque tranche, profondeur intéressée par le déssèchement, rapidité de remplissage ou de cession de l'eau, homogénéité de la recharge sous l'effet de tel ou tel type d'apports — sont nombreux et éminemment variables. Si leur détermination suppose des approches méthodologiques quelque peu différentes, la mesure directe de l'humidité volumique du sol en place en constitue le point de départ commun et la méthode neutronique apparaît la plus appropriée comme le montre la dizaine de communications auxquelles se réfèrent Guennelon et Cabibel dans leur article de synthèse.

A elle seule cependant, la mesure de l'humidité du sol est rarement suffisante lorsque l'on veut clore un bilan ou, plus précisément, déterminer soit *l'évapotranspiration* dans le cadre d'études sur la satisfaction des besoins en eau des cultures (ou l'irrigation par exemple), soit les *flux en profondeur* (cas des études sur le drainage naturel de l'eau et des polluants ou sur l'appréciation des systèmes d'assainissement).

Plusieurs communications traitant de ces déterminations (de même que l'article de MM. Daudet et Vachaud qui en fera la synthèse) font ressortir les erreurs que l'on est susceptible de commettre à cet égard ; mais les travaux présentés montrent aussi comment la mesure neutronique, couplée à des déterminations directes de flux ou de succion permet d'atteindre ces termes du bilan.

---

(1) Chef du Département de Bioclimatologie, Centre de Recherches agronomiques de Versailles, Institut national de la Recherche agronomique.

Ainsi la technique neutronique de mesure de l'humidité du sol, qui se suffisait à peu près à elle-même dans l'étude de la réserve du sol peut aussi rendre de grands services dans l'analyse des bilans, mais à condition de n'être retenue que comme l'élément d'une méthodologie plus globale. Les techniques qui doivent lui être associées en vue de la mesure des flux ou des tensions, loin de la supplanter, ne peuvent en réalité qu'élargir ou améliorer les possibilités qu'elle offrait déjà.

3. — Exposé de J. Marcesse (1)

Résultats d'une enquête sur les humidimètres à neutrons de profondeur utilisés en France (1976)

Résumé

Cinquante-deux humidimètres à neutrons de profondeur utilisés en France dans trente-sept unités de travail ont effectué en 1976 des mesures dans mille quatre cents tubages implantés verticalement dans les sols ; trois stations possèdent des dispositifs à tubages horizontaux. Les relevés neutroniques sont réalisés le plus souvent chaque semaine (40 p. 100) ou quotidiennement (30 p. 100) en milieu naturel (42 p. 100) ou en cultures expérimentales (32 p. 100). Les travaux abordés principalement par l'INRA ou les universités se répartissent de manière homogène dans les domaines suivants : hydrogéologie, drainage, hydropédologie, bilans d'évapotranspiration, irrigation.

Une enquête a été lancée par le Service de Radioagronomie au cours du second trimestre 1976 en vue de recenser les sondes à neutrons de profondeur, utilisées tant en France qu'à l'étranger par des organismes français de coopération. Elle a été en règle générale bien accueillie et a touché sans doute plus de 90 p. 100 des utilisateurs.

Elle a révélé que trente-sept groupes de travail (tabl. 1, colonne (1)) utilisaient en France cinquante-deux appareils, tandis que cinq réponses faisaient état de trente sondes servant à l'extérieur (ORSTOM, IRAT...).

Les résultats présentés dans cette étude tiennent uniquement compte de la situation en métropole. Les appareils y sont répartis géographiquement de façon relativement homogène avec cependant trois pôles de concentration dans les régions de Paris, Marseille et Bordeaux. Quant aux groupes de travail, ils se classent de la manière suivante : INRA (11), Universités (8), Organismes d'Aménagement (4), Grandes Ecoles (3), Services d'Equipement (3), CEA (2), divers (6).

I. — *Matériel utilisé*

1. — *Appareils.*

Sur les cinquante-deux sondes recensées, trente-huit sont de fabrication française, soit trois sur quatre. Toutes sont en principe en état de fonctionnement ; leur durée d'exploitation est estimée supérieure à dix ans.

Le tableau 1, colonne (3) donne l'inventaire du parc matériel avec les années de mise en service dans les organismes utilisateurs.

(1) Service de Radioagronomie, Département de Biologie, CEN de Cadarache, Commissariat à l'Energie Atomique.

TABLEAU I

Inventaire des sondes à neutrons utilisées en France

(1) Organisme et Lieu	(2) Domaine Application	(3) Sonde utilisée Nbre et Année d'Acquisition		(4) Fréquence des Mesures #	(5) Nombre des Tubages	(6) Localisation des Mesures
	HYDrologie	Nuclear Chicago	(2)	QUOtidienne (29 p. 100)		CAse EXpérim. (8 p. 100)
	HYdroPédologie	LEPaute	(22)	BIHebdomad. (7 p. 100)		CUlt. EXpérim. (32 p. 100)
	DRainage	PITman	(2)	HEBdomad. (39 p. 100)		CHamp (18 p. 100)
	EvapoTranspirat.	RONly	(3)	BIMens. (14 p. 100)		MILieu NATurel (42 p. 100)
	IRrigation	BERthold	(1)	Mensuel (11 p. 100)		
	Travail Sol	NEA	(7)			
	Divers	Nemo	(3)			
		Solo	(12)			
		Total	(52)			
INRA						
Angers (Agro)	E.T.	Solo	(76)	HEB	110	CU. EX/CH
Avignon (Sce Sol)	IR/E.T.	NEA	(74)	QUO	25	CA. EX/CU. EX
Bordeaux (Agro)	DR/E.T.	Solo	(76)	BIH/BIM	20	CH/MI. NAT
Châlons (Sce Sol)	HY. P.	LEP	(64)	HEB		CH
Châteauroux (Agro)	DR/IR	LEP	(62)	BIM		MI. NAT
Clermt Fd (Agro)	E. T.	LEP	(68)	M	25	CA. EX
Dijon (Sce Sol)	DR	NEA	(74)	BIM		CA. EX/MI. NAT
Grignon (Agro)	T.S.	Solo	(76)	QUO		CU. EX
Toulouse (Agro).....	E.T./IR	LEP	(65-67)	HEB	100	CA. EX/CU. EX
Versailles (Bioclimatc)	HY.P./E.T.	Solo	(75)	HEB		CU. EX
Versailles (Sce Sol)	DR	NEA	(74)	QUO		CU. EX/CH
UNIVERSITÉ						
Bordeaux (Hydro)	HYD	N.C.	(64)			
		LEP	(65)	HEB		MI. NAT
Bordeaux (Oenol.)	DR/E.T.	LEP	(66-67-73)	M		CH

Grenoble (IMG)	HYD/HY.P.	N.C.	(59)			
		PIT	(69)			
		Nemo	(71)	QUO		MI. NAT
Montpellier (CEPE)	HY.P./E.T.	RON	(71-72)	HEB	25	CU. EX/MI. NAT
Orsay (écol.)	E.T.	Solo	(76)	QUO	25	MI. NAT
Paris (géol.)		LEP	(70)	HEB		MI. NAT
Strasbourg (écol.)	E.T.	LEP	(76)	QUO		MI. NAT
Thonon Paris (géol.)	HYD/HY. P.	NEA	(74)	QUO/HEB		CA. EX/MI. NAT
ÉCOLES						
Montpellier (ENSA)		Solc	(75)	QUO		CU. EX
Nancy (ENSAIA)	DR/E.T.	LEP	(70)	M	25	CU. EX/CH
Paris (ENSM)	HYD/E.T.	Nemo	(74)	QUO		MI. NAT
ÉQUIPEMENT						
Aix-Clermt (CETE)	DR	Solo	(75)	QUO/BIM		MI. NAT
Périgueux (DDE)	HYD	LEP	(69)	HEB		MI. NAT
Rouen (CETE)	Divers	LEP	(67)	M		MI. NAT
CEA		LEP	(68-72)			
Cadarache (SESA)	HY.P./E.T.	Solo	(75)	QUO/M		CU. EX/MI. NAT
		LEP	(64)			
Cadarache (SRA)	HYD	Nemo	(71)			
		Solo	(75)	BIH		MI. NAT
AMÉNAGEMENT						
Aix (CTGREF)	E.T./IR	NEA	(74)	BIM		CU. EX
Antony (CTGREF)	DR/E.T.	NEA	(71)	HEB	25	CH/MI. NAT
Nîmes (B. Rh. L)	IR	LEP	(72)	BIM	25	CU. EX
Tarbes (C. G.)	IR	LEP	(66)			
		Solo	(76)	HEB	25	CU. EX
DIVERS						
Boigneville (ITCF)	T.S.	Solo	(76)	HEB	45	CU. EX
Bourges (Lafont)	DR/IR	BER	(68)	HEB	250	CH
Carcassonne (CH. AG)	IR	RON	(72)	HEB	25	CU. EX/CH
Nancy (CNRF)	E.T.	NEA	(73)	BI.H		MI. NAT
Manosque (ITCF)	E.T./IR	LEP	(68)			
		Solo	(76)	HEB	400	CU. EX
Orléans (BRGM)	HYD	PIT	(71)	QUO		CH/MI. NAT

La croissance du parc sondes qui est de trois unités par an, en moyenne jusqu'en 1974, double ensuite comme le montre le tableau 2 :

TABLEAU 2

Année.....	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
Nombre de sondes	7	11	14	18	21	23	28	32	34	40	45	52

Dans le tableau 3 sont données les principales caractéristiques des sondes à neutrons utilisées. On note que le Radium 226 a été abandonné au profit de l'Américium 241 dont l'émission gamma parasite est nettement moins élevée.

TABLEAU 3

Caractéristiques des sondes en service en 1976

Sondes en service	Type	Sources de neutrons rapides Ra226-Be	Am241-Be	Détecteurs de neutrons lents	Sortie des résultats	Poids kg
2	Nuclear Chicago	5 mCi	(1)	Compteur BF_3	Aff. numér.	21
3	Nemo		150 mCi	— —	Cass. magn.	25
3	Ronly		100 mCi	— —	Aff. numér.	19
22	Lepaute		80 mCi	— —	Ictomètre ou aff. numér.	15
2	Pitman		50 mCi	— —	Aff. numér.	12
1	Berthold		30 mCi	Cristal Scin.	Ictomètre	18
7	NEA		30 mCi	— —	Aff. numér. ou imprim.	21
12	Solo		10 mCi	Compteur 3He	Imprimante	6

(1) 1 mCi d'Am-Be émet environ 2 200 neutrons rapides/seconde.

Toutes les sondes ont un diamètre de 39 mm qui les rendent compatibles entre elles pour être introduites dans les mêmes tubages d'accès.

Elles sont alimentées de manière autonome par des batteries rechargeables Cd-Ni. La longueur du câble de liaison entre la sonde et le lecteur, généralement de 5 à 7 m, peut atteindre jusqu'à 30 m pour les modèles Lepaute, NEA, Solo.

En ce qui concerne les appréciations sur le matériel et le service après vente, les utilisateurs ont répondu de la manière suivante :

a) sur le matériel

Satisfaits	21
Moyennement satisfaits	11
Non satisfaits	0
Sans opinion	5

b) sur le service après-vente

Satisfaits	8
Moyennement satisfaits	5
Non satisfaits	10
N'y ont pas eu recours.....	10
Se dépannent eux-mêmes	4

2. — *Tubages.*

Les utilisateurs de sondes ont implanté 1 400 tubages représentant près de 3 200 m en longueur cumulée. La colonne (5) du tableau 1 donne la répartition en nombre de tubages pour les unités de travail qui en utilisent plus de 20.

Toutes les stations emploient des tubages en alliage d'aluminium AG3, la plupart exclusivement. Nîmes, Bordeaux Oenologie, Cadarache SESR, utilisent également des tubes en acier inoxydable. Le plastique PVC est mis en œuvre à Angers, Boigneville, Orsay, Manosque et Versailles.

La longueur des tubes implantés est de 3 à 6 m sur neuf centres d'études, 1 à 3 m sur vingt-huit centres dont cinq utilisent uniquement des tubes inférieurs à 1,5 m.

Le positionnement des tubes est vertical dans toutes les stations. Trois d'entre elles disposent en outre de dispositifs de mesures par tubes horizontaux sous cultures.

Manosque ITCF : seize tubes de 30 m en PVC
Nimes BRhL : quatre tubes de 30 m en inox et 6 en PVC
Cadarache SRA : dix-sept tubes de 2,5 m en AG3.

II. — *Méthodes*

Les points de méthodologie abordés dans l'enquête concernent *la fréquence* des relevés neutroniques sur le terrain, *la localisation des mesures* et *le mode d'étalonnage utilisé* pour convertir des comptages de neutrons lents en teneur en eau volumique.

Les colonnes (4) et (6) du tableau 1 résument les informations portant sur les deux premiers points.

L'étalonnage consiste à fournir pour chaque horizon de sol la courbe de réponse de la sonde utilisée en fonction du taux d'humidité volumique. Celui-ci peut être déterminé par la méthode gravimétrique en mesurant l'humidité par séchage d'échantillon, la densité soit par pesée d'un volume de sol extrait, soit par gammadensimétrie. Une nouvelle méthode, dite neutronique, fournit l'équation de la courbe à partir des caractéristiques neutroniques mesurées sur échantillon de terre. La répartition d'utilisation est la suivante :

— emploi de la méthode gravimétrique : 19
— emploi de la méthode neutronique : 6
— emploi des deux méthodes : 12

III. — *Travaux abordés*

La colonne (2) du tableau 1 donne, pour ce qui concerne les programmes d'emploi des sondes, une récapitulation qui est un peu schématique, les utilisateurs effectuant souvent plusieurs études en annexe des objectifs principaux.

Les intitulés retenus pour les différentes rubriques appellent les commentaires ci-après :

— *hydrogéologie* : il s'agit essentiellement d'analyses de mouvement d'eau en bassin versant et en milieu non saturé ;

— *drainage* : sont prises en considération des études de systèmes drainants et d'infiltration en profondeur ;

— *hydropédologie* : études comportant, au moins partiellement, l'analyse *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques : capacité à la saturation ou à la rétention, vitesse du front d'humectation, conductivité hydraulique suivant la teneur en eau et la profondeur, porosités... ;

— *évapotranspiration* : l'évolution du stock hydrique du sol associé à la connaissance des apports d'eau permet de traiter deux domaines d'études : soit au niveau des cultures (efficience de l'eau, prévision des besoins...), soit au niveau du comportement physiologique de la plante (système racinaire...) ;

— *irrigation* : il s'agit du contrôle ou du pilotage des arrosages ;

— *travail du sol* : les études portent sur l'influence de ce travail sur les caractéristiques hydrodynamiques des sols ;

— *divers* : pour Rouen, il s'agit de contrôle hydrique dans des terrassements, pour Paris I, d'études géophysiques concernant l'interprétation des sondages électriques en fonction de la teneur en eau du sol.

IV. — *Conclusion*

Pendant la dernière décennie, les humidimètres à neutrons ont bénéficié de progrès techniques importants et il semble que les récents utilisateurs s'orientent plutôt vers des appareils faiblement radioactifs (Solo) ou combinant les mesures simultanées d'humidité et de densité (NEA). Le parc matériel devrait s'accroître désormais à un rythme nettement plus rapide, avec toutefois le frein du prix de l'équipement qui ne descend guère au dessous de 25 000 F (1977).

L'enquête fait ressortir que la méthode neutronique est utilisée en France dans des sujets d'études très divers et que les utilisateurs sont essentiellement des organismes de recherches dont le principal est l'Institut National de la Recherche Agronomique. L'emploi des sondes n'a pas encore franchi le stade de l'exploitation agricole et c'est ainsi que, pour l'instant, il n'existe pas d'exemple d'asservissement direct de déclenchement d'arrosage à partir de mesures neutroniques.

On remarque, pour conclure, que la plupart des utilisateurs limitent l'exploitation des mesures neutroniques à la détermination de bilans hydriques en fonction du temps, alors qu'un nouveau champ d'application devrait s'ouvrir dans l'analyse plus fine des mouvements de l'eau avec l'association de sondes à neutrons, de tensiomètres et de marqueurs isotopiques.

Summary

Results on an investigation concerning depht neutron moisture gauges used in France (1976)

Fifty-two depht neutron moisture gauges are used in thirty-seven french units of works and have given in 1976 measurements in a thousand and four hundred access tubes places into the soil vertically ; three agronomic stations have systems of horizontal tubes placed under cultivation. Neutronic

profils are often realised weekly (40 p. 100) or daily (30 p. 100) in natural vegetation (42 p. 100) or in fields of experimentation (32 p. 100). Research works, made mostly by INRA or University's laboratories, can be distributed equally in following classes : hydrogeology, drainage, hydropedology, evapotranspiration, irrigation.

Zusammenfassung

Ergebnisse einer Erhebung über die in Frankreich eingesetzten Neutronentiefenfeuchtigkeitsmesser (1976)

52 Neutronentiefenfeuchtigkeitsmesser, die in Frankreich in 37 Arbeitsbereichen eingesetzt sind, haben im Jahre 1976 Messungen in 1400 vertikal in den Boden installierten Röhren durchgeführt. 3 Stationen besitzen horizontale Rohrvorrichtungen. Die Neutronenmessungen werden meistens jede Woche (40 p. 100) oder täglich (30 p. 100) vorgenommen, und zu 42 p. 100 in natürlicher Umgebung oder zu 32 p. 100 in Versuchskulturen.

Die hauptsächlich vom INRA oder von den Universitäten verwirklichten Arbeiten sind gleichmässig auf folgende Gebiete verteilt : Hydrogeologie Entwässerung, Hydropedologie, Evapotranspirationsbilanzen und Bewässerung.

РЕЗЮМЕ

Результаты анкеты о глубинных нейтронных влагомерах, применяющихся во франции (1976). МАРСЕСС Ж.

52 глубинных нейтронных влагомера применялись во франции в 1976-м году в 37-ми рабочих единицах для проведения измерений в 1400-х вертикальных шурфах ; три станции располагали кроме того шурфами горизонтальными. Нейтронные измерения проводились чаще всего (40 %) каждую неделю, реже (30 %) — ежедневно, в природной среде (42 %), или в экспериментальбных культурах (32 %).

Работы эти проводились в большинстве случаев станциями И. Н. Р. А. и университетов, и равномерно распределялись между следующими отраслями : геология, дренаж, гидропедология, балансы эвапотранспирации и орошение.

II. — Liste des communications

BARON J. P. Mesure de l'humidité des granulats stockés en trémie par la méthode neutronique.

BONNET M., LALLEMAND-BARRÈS A., SAMSON A. Etude comparée de la propagation des nitrates dans deux types de sols : Saucats (Gironde), Darvoy (Val de Loire).

CABIBEL B. Détermination des teneurs en eau du sol à l'aide de deux types d'humidimètres.

CABELGUENNE M., MAERTENS C. Utilisation des profils hydriques neutroniques pour études de modalité d'utilisation des réserves en eau du sol par différentes cultures.

CARIOU J. Utilisation d'un humidimètre neutronique pour le contrôle de chantiers routiers.

CHAMBON J. Utilisation de la méthode neutronique pour réaliser des bilans hydriques *in-situ* sous cultures de céréales et fourrages.

COSANDEY C. M. (Mme). Etude de la réserve en eau du sol à la fin de l'été 1976, en Bretagne et comparaison avec les constantes hydriques déterminées en laboratoire.

DAUDET F., VALANCOGNE Ch., AHO N., KATERGI N. Bilan d'eau d'une culture de blé d'hiver avec la sécheresse 1976. Contribution des couches profondes à l'alimentation hydrique de la culture.

DELHUMEAU M. Influence du couvert végétal sur le régime hydrique du sol en différents sites du bassin versant de l'Oued Sidi Ben Nasseur.

HAVERKAMP R., THONY J. L., VAUCLIN M. Mesure de l'humidité superficielle au moyen d'une sonde de profondeur.

ISBERIE C. (Melle). Evolution de profils hydriques au cours de l'année sur verger irrigué, observée à l'aide d'une sonde neutro-gammamétrique NEA sur tubes verticaux. Etalonnage. Mise en relation avec la granulométrie.

LIVET M. Evolution des pressions interstitielles et des teneurs en eau dans un massif argileux.

LUC J. P. Etalonnage d'une sonde SOLO.

MARCESSE J., VALET S. Prospection hydropédologique d'un périmètre agricole, à l'aide d'un humidimètre à neutrons.

MARCESSE J. Analyse neutronique des sols pour l'étalonnage des sondes à neutrons et leur caractérisation pédologique.

MARINI P., BARAN R., VILLEMIN P. Etude de la distribution à partir des asperseurs et de la redistribution dans le sol des eaux d'irrigation ; le sol est nu ou porte une culture de canne à sucre.

MÉRIAUX S. (Mme). Alimentation hydrique de la canne de provence en sol limoneux profond.

MÉRIAUX S. (Mme). Relation entre la réhumectation du sol et l'écoulement des drains en sol lessivé hydromorphe.

MOUTONNET P. La mesure neutronique de l'humidité des sols : intérêts et limitation.

NORMAND M., DARTHOUT R., BOURGEOIS J. P. Apport des sondes gamma-neutroniques dans les études sur périmètres expérimentaux de drainage.

PANINE M. Utilisation de la méthode neutronique pour l'étude de la distribution de l'eau dans un sol caillouteux.

PEYREMORTE P. Dispositif composé de tubages horizontaux permettant d'améliorer les performances de la méthode neutronique appliquée à la mesure de l'évapotranspiration des cultures.

PUECH J., HERNANDEZ M. Bilans hydriques pluriannuels de diverses rotations culturales en présence ou non d'irrigations. Conséquences agronomiques.

RAMBAL S. Analyse en composantes principales des variations des stocks d'eau du sol.

RAMBAL S. Comparaison des humidimètres LEPAUTE et RONLY.

ROSSET J. M., CHAMBON J. Une méthode indirecte d'étalonnage de la sonde SOLO.

ROULOT D., MARINI P., MOUTONNET P. Le pal à neutrons.

THONY J. L., VACHAUD G., VAUCLIN M. Quelques considérations sur l'étalonnage des sondes à neutrons.

VALANCOGNE Ch., FOUÈRE A., AHO N. Comparaison des humidimètres SOLO et HP 310.

VALANCOGNE Ch., FOUÈRE A., AHO N. Contrôle de l'étalonnage basé sur l'étude neutronique d'échantillons de sol.

VAUCLIN M., VACHAUD G. Bilan d'eau sur sol nu et cultivé : Fiabilité des résultats.

Ann. agron., 1977, **28** (5), 477-488.

III. — Articles de Synthèse

Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols

Ph. COUCHAT

Commissariat à l'Energie Atomique,
Département de Biologie, Service de Radioagronomie,
C.E.N. de Cadarache, BP nº 1, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance (France)

Résumé

Dans cet essai de synthèse, l'auteur s'est attaché à faire ressortir l'importance de deux aspects relatifs à l'utilisation des humidimètres à neutrons. Il y a d'une part la mise en place des expériences qui conditionne la représentativité de la mesure et doit résoudre le problème de l'hétérogénéité des sols ; sont abordés dans cette partie les questions liées au nombre de tubes, leur modalité d'implantation, l'utilisation du pal à neutrons, des tubes horizontaux, le cas particulier des mesures de surface. On trouve d'autre part l'étalonnage des sols et des humidimètres pour lesquels deux méthodes sont étudiées ; après examen des divers paramètres (type de sol, densité sèche, géométrie de mesures...) qui conditionnent la réponse des humidimètres, on analyse l'étalonnage direct par mesure classique de la teneur en eau volumique et l'étalonnage indirect par mesure des constantes neutroniques d'échantillons de sol.

A l'occasion d'une rencontre tenue à Cadarache en 1969, des utilisateurs de la méthode neutronique s'étaient accordés pour reconnaître que les humidimètres à neutrons posaient encore de nombreux problèmes technologiques et méthodologiques, limitant leur utilisation. Aujourd'hui, le bilan de l'expérience de divers laboratoires présenté au cours du séminaire de novembre 1976 permet de mesurer l'acquis réalisé ces dernières années dans ce domaine.

Nous avons réparti notre essai de synthèse des communications en deux rubriques portant l'une sur des problèmes d'expérimentation dans les études de bilan et de transfert d'eau en sol nu et cultivé, l'autre sur l'étalonnage des humidimètres ; puis nous avons conclu sur quelques considérations relatives au développement futur de la méthode neutronique.

Soulignons malgré tout, avant d'aller plus loin, la diversité des appareils actuellement en service, le fait que chez la plupart des auteurs l'humidimètre n'est cité que pour mémoire, l'absence de remarques concernant le fonctionnement propre des sondes. Il n'apparaît pas excessif de dire que l'humidimètre est dorénavant un outil de mesure routinier , c'est ainsi qu'à la station d'Agronomie de Toulouse la méthode neutronique est appliquée depuis plus de dix ans et que soixante à soixante-dix tubes y permettent la détermination des profils hydriques en vue d'étudier les modalités de consommation en eau des cultures.

I. — Problèmes d'expérimentation

En régle générale, on effectue une mesure neutronique en introduisant l'humidimètre dans un tubage vertical. Ce faisant, on se limite à une prospection ponctuelle de la distribution horizontale de l'eau du sol. Des questions comme la mise en place, le nombre et le choix de l'emplacement des tubages prennent alors une importance particulière si l'on veut, dans le même temps, restreindre l'échantillonnage et assurer une bonne représentativité des mesures.

Le tubage est introduit en force dans un trou préalablement creusé avec une tarière d'un diamètre légèrement inférieur à celui du tube ; il en résulte un bon contact entre la paroi du tubage et le sol (Isberie) et l'élimination d'une cause d'erreur due à la géométrie de mesure. En opérant ainsi, on satisfait à la nécessité de supprimer les infiltrations préférentielles (Marcesse). Ce premier travail ne pose aucun problème particulier dans le cas fréquent où le tube est en alliage aluminium (AU_4G). Cependant le choix du matériau peut répondre à des considérations économiques lorsque le nombre de tubes implantés devient important ; la plupart des expérimentateurs se tournent alors vers le tubage en matière plastique (PVC) meilleur marché mais un peu plus délicat à mettre en œuvre (Chambon, Marini).

Le nombre de sites analysés dépend de la représentativité attendue de la mesure, sachant qu'en tout état de cause un humidimètre donne un reflet de la teneur en eau du sol et de ses variations à l'intérieur d'un cylindre de 15 cm de diamètre environ. Si l'on désire appréhender la répartition d'humidité sur un plan horizontal, particulièrement après un épisode de pluie ou d'irrigation, le problème est quasiment insoluble. En effet, Moutonnet montre, par des mesures en tubes horizontaux, qu'à l'échelle décimétrique l'hétérogénéité horizontale va de $\pm$ 2 p. 100 à $\pm$ 4 p. 100 d'humidité volumique pour une profondeur de 30 cm ; cependant par suite de la diffusion de l'eau dans le sol, ce phénomène s'atténue et par exemple à la profondeur de 1 m on n'observe plus qu'un écart de $\pm$ 0,6 H_v. En conséquence lors d'un bilan établi sur un seul tube l'erreur peut être de $\pm$ 20 mm pour 50 mm d'apport.

L'expérimentateur qui veut établir des bilans sur des parcelles cultivées est donc conduit à multiplier le nombre de points de mesure : on note dans le cas extrême jusqu'à six cents tubes pour une campagne (Chambon) ; mais implanter cinquante à soixante-dix tubages correspondant à vingt mille mesures annuelles n'est pas exceptionnel (Cabelguenne, Puech) et Daudet fait état d'une expérimentation de deux parcelles de 16 m² avec quatre tubes par parcelle.

Cet état de fait a entraîné la mise au point d'une version simplifiée de l'humidimètre : le pal à neutrons (Roulot). Cet appareil se présente sous la forme d'un tube métallique muni en son extrémité pointue d'un ensemble source Am-Be, détecteur BF_3 et préamplificateur ; à l'autre extrémité se trouvent deux bras de manutention dont l'un enferme les batteries. Le croisillon reçoit le système électronique de lecture, un simple trou à la tarière suffit pour l'acquisition des informations sur l'humidité jusqu'à 90 cm. Pour suivre l'évolution d'un profil, il reste la possibilité d'implanter un tubage ; ainsi a pu être menée à bien à l'aide de quarante-neuf points d'observation, l'étude de la distribution à partir des asperseurs et de la redistribution dans le sol des eaux d'irrigation sur sol nu et sous culture de canne à sucre (Marini).

De son côté Peyremorte propose d'utiliser en routine des sondages horizontaux

sous culture. Constatant l'interdépendance des mesures faites tous les 10 cm en profondeur, il suggère l'installation de tubes horizontaux à — 20 cm, — 60 cm, — 100 cm. Ramenée à trois points, la lecture du profil vertical est obtenue avec seulement une perte de 3 à 7 p. 100 en valeur relative sur la précision ; par contre, on intègre l'hétérogénéité horizontale qui est, comme nous l'avons vu, bien plus importante. A cela s'ajoutent d'autres avantages comme la pérennité de l'installation et la possibilité de mesure même en cas de pluie. C'est ainsi que douze parcelles élémentaires de 5 m × 6 m ont été équipées à partir du schéma de la figure 1 ; les intervalles de con-

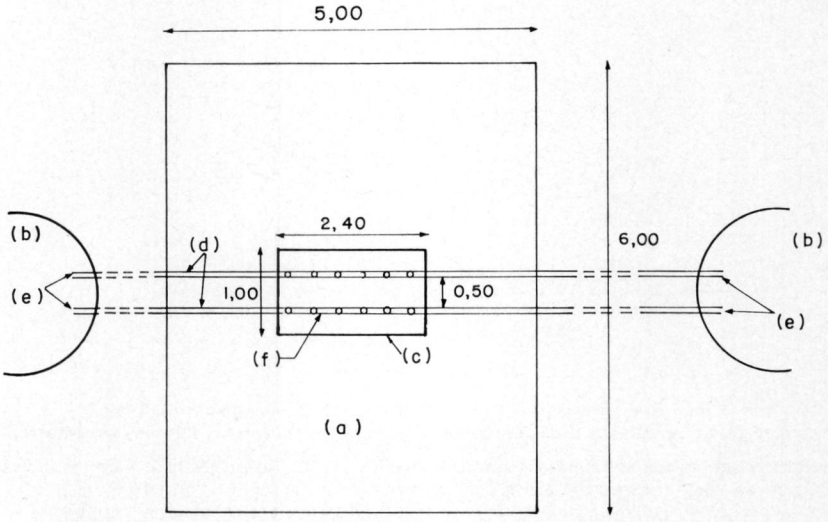


FIG. 1. — *Dispositif à tubages horizontaux* (d'après Peyremorte).

a) Parcelle élémentaire (répétée 6 fois).
b) Fosse d'accès.
c) Cadre métallique (légèrement enterré pour limiter le ruissellement).
d) Tubes horizontaux (deux à chaque profondeur 0,20 - 0,60 - 1 m).
e) Cordelette destinée à l'entraînement de la sonde.
f) Points de mesure (douze par parcelle).

fiance de la moyenne des bilans se trouvent ramenés à une valeur comprise entre 2 et 4 mm (fig. 2) et le gain de temps est de 75 p. 100. Malgré les exigences liées aux conditions de son application (ouverture d'une tranchée, parfaite continuité des horizons à analyser, pas d'arrière effets liés aux traitements étudiés), cette méthode offre des possibilités intéressantes dans les mesures de routine pour les bilans sous culture.

Dans le cas où la recherche porte sur les caractéristiques hydrodynamiques du sol, la notion de représentativité se présente différemment puisque l'analyse de l'évolution de l'humidité sur un tube fournit déjà une information. Ce type d'expérience conduit généralement à l'estimation de la conductivité hydraulique dont la distribution sur une parcelle n'est plus de notre propos. Ainsi on trouve mention d'une densité de trois tubes pour 100 m² dans l'étude de l'influence du couvert végétal sur le régime hydrique du sol en différents sites d'un bassin versant (Delhumeau) ; dans un autre cas, il s'agit de huit tubes pour 30 ha en vue d'estimer un degré global et approximatif des réserves et de comparer les constantes hydriques aux valeurs de P_F (Cosandey).

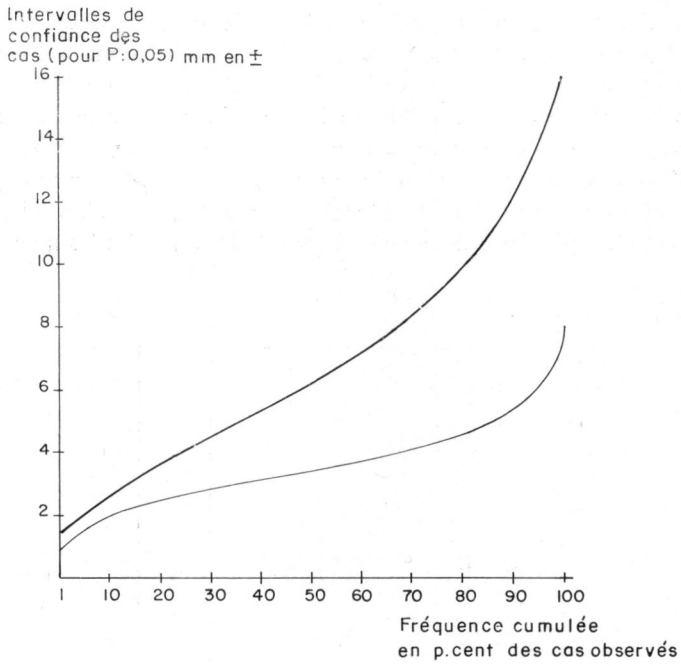


FIG. 2. — *Précision acquise avec le dispositif à tubages horizontaux comparée à celle obtenue avec des tubages implantés verticalement* (d'après Peyremorte).

— Résultats observés sur soixante-dix-sept bilans effectués sur le dispositif à tubages horizontaux à raison de vingt-quatre répétitions par horizon.

— Comparaison des résultats obtenus sur quarante bilans effectués à partir de 18 tubages verticaux (précision observée corrigée par le rapport $\sqrt{18}/\sqrt{24}$ pour éliminer l'effet imputable au nombre de répétitions).

Dans le cadre d'une prospection hydropédologique, l'évolution des profils hydriques obtenus sur un tube dans un site choisi permet une extrapolation sur une moyenne de 100 ha, en vue d'un aménagement hydro-agricole ; cette extrapolation, bien sûr, tient compte des données purement pédologiques (Marcesse). Toutes ces approches n'ont de valeur qu'autant que l'on s'intéresse aux constantes hydrodynamiques des sols qui présentent aussi leur propre variabilité.

Comme on le voit, l'éventail des modalités d'utilisation des tubes est très large. Cette diversité reflète un niveau important d'utilisation de la méthode neutronique ; elle impose à l'utilisateur de définir de manière précise son problème avant de se lancer dans une expérience où le protocole de mesure est capital.

Il reste à dire quelques mots sur l'aspect particulier des *mesures de surface*. Elles ont une double importance liée d'une part à la forte participation des horizons superficiels dans le bilan hydrique, d'autre part au faible pouvoir de résolution de l'humidimètre classique (15 cm).

Deux méthodes ont été proposées : l'utilisation d'un réflecteur neutronique en matière plastique placé au milieu du tube sur le sol et qui permet de simuler pour une profondeur de 10 cm la mesure en milieu infini (Marini, Puech) ; l'étalonnage spécial de l'humidimètre, utilisé tel quel, pour les couches de surface (Haverkamp).

Cette seconde méthode d'utilisation est plus complexe puisqu'elle requiert un étalonnage complémentaire. Ceci étant, la connaissance des mouvements d'eau dans la zone interface sol-atmosphère présente en soi un intérêt agronomique certain, ne serait-ce que pour l'étude du ruissellement. Mais curieusement, la méthode particulière mise au point par le CEA, pour les mesures de surface (humidimètre de surface à pointe) a été plutôt développée par les Ponts et Chaussées, entre autres pour le contrôle des chantiers (Cariou). Bien évidemment se pose pour cet appareil comme pour les précédents un problème d'étalonnage que nous allons maintenant aborder.

II. — Problèmes d'étalonnage

La réponse d'un humidimètre à neutrons est, on le sait, influencée par le type de sol et par la densité sèche ; on est aussi amené à tenir compte de la géométrie et du type de sonde. Pour un appareil dont la source Am-Be se trouve en position centrale par rapport au détecteur BF_3, le comptage de neutrons thermiques fourni par l'appareil s'exprime par la formule $N = (\alpha\rho_s + \beta)\, H_v + \gamma\rho_s + \delta$ où ρ_s est la densité sèche et α, β, γ, δ sont des coefficients caractéristiques du sol. Lors du passage d'un sol argileux à un sol sableux, on remarque un accroissement de l'influence de ρ_s sur la pente de la droite d'étalonnage (α) et inversement une diminution de cette influence sur l'ordonnée à l'origine (γ) (fig. 3) ; ce deuxième point s'explique assez bien par l'in-

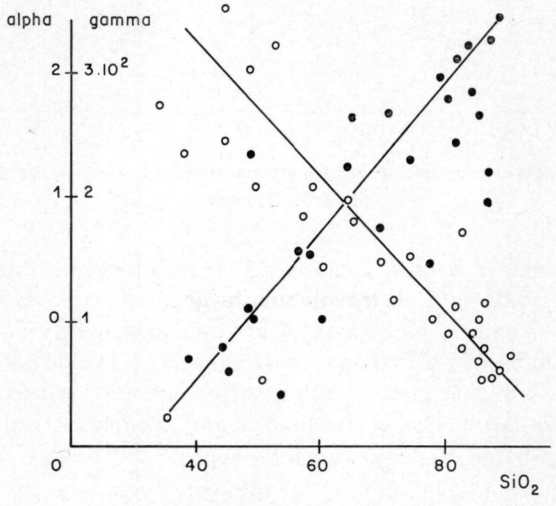


FIG. 3. — *Variation des coefficients* α (●) et γ (○) *en fonction de la teneur en* SiO_2 *d'un sol* (d'après Marcesse).

tervention sur le comptage de l'eau de constitution des argiles. On vérifie également que la courbe d'étalonnage est en bonne relation avec le profil pédologique et que sa variation dans le plan horizontal, à l'échelle du mètre est généralement très faible (inférieure à 4 p. 100 sur le site de Cadarache). Nous avons là une explication des résultats expérimentaux obtenus par Cosandey sur des sols de Bretagne où la simple

analyse des valeurs H_v/N par tube met en évidence directement l'influence combinée de la densité sèche et du profil pédologique (fig. 4).

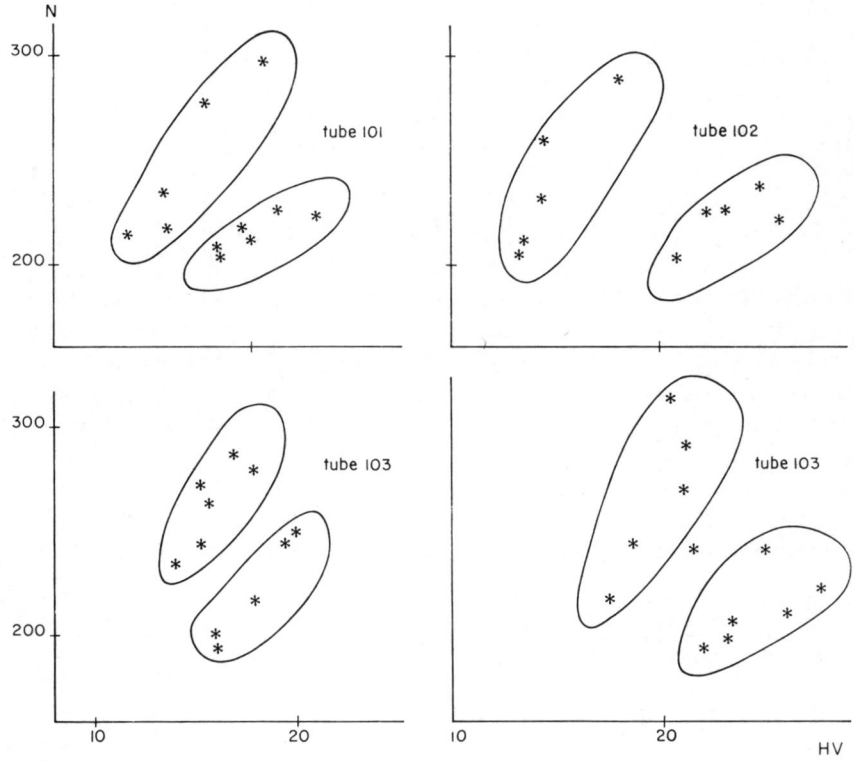


FIG. 4. — *Points images de la corrélation entre l'humidité volumique et le comptage présenté tube par tube* (d'après Cosandey).

Le poids du facteur densité sèche a été étudié expérimentalement de manière plus détaillée à l'occasion d'un travail sur les granulats stockés en trémie pour la fabrication du béton en centrale (Baron). Dans une gamme de densité sèche qui varie approximativement de 1,35 à 1,60 on a pu vérifier (fig. 5 et 6) la validité de la formule pour cent quatre-vingt cinq mesures faites sur un sable de Seine (influence forte sur la pente, faible sur l'ordonnée à l'origine). Dans le contexte expérimental où il se trouve placé (travail en trémie), l'auteur propose une double mesure simultanée gamma-neutron pour aboutir à une définition de l'humidité pondérale. La sonde comporte une source ^{137}Cs, une source Am-Be et un scintillateur plastique associé à un photomultiplicateur ; les résultats sont fournis à $\pm$ 0,25 points d'humidité pondérale.

Les autres paramètres qui peuvent modifier la courbe de réponse des humidimètres sont le type de sonde et la géométrie de mesure. Pour les sondes à source centrée sur le détecteur, entrent en ligne de compte les caractéristiques de la source et celles du détecteur. Puisque toutes les sources utilisées actuellement sont des mélanges Am-Be, seul le changement d'activité influence le résultat et le passage d'un appareil à l'autre se fait à partir des mesures de référence. Il existe par contre différents

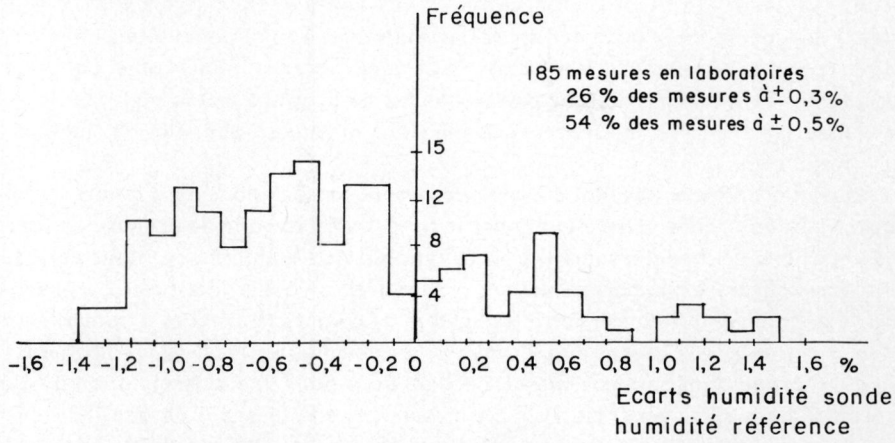


FIG. 5. — *Distribution des écarts d'humidité sur cent quatre-vingt cinq mesures effectués par sonde neutronique et exploités à partir d'un étalonnage classique qui ne prend pas en compte l'influence de la densité sèche* (d'après Baron).

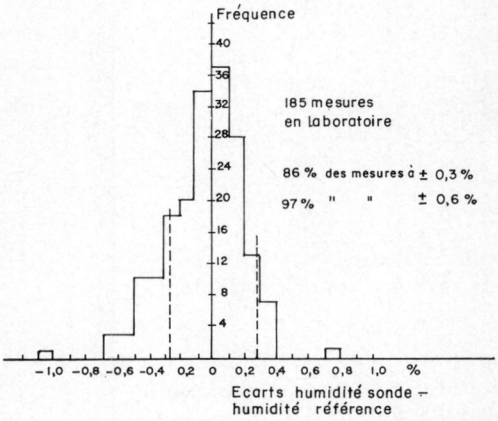


FIG. 6. — *Distribution des écarts d'humidité sur cent quatre-vingt cinq mesures effectuées par sonde à neutrons et exploités avec un étalonnage qui prend en compte la densité sèche* (d'après Baron).

types de compteurs qui interviennent par leur courbe de réponse au spectre des neutrons. Pour les sondes à détecteur ^3He, Valancogne a montré que la relation avec la sonde à BF_3 était linéaire dans une gamme allant de 10 à 30 p. 100 H_v pour le sol de Versailles : la part importante de neutrons épithermiques détectés par le capteur à ^3He n'a donc pas de répercussion relative sur la mesure de teneur en eau. Il reste à étendre ce résultat à d'autres sols et pour une gamme plus étendue de teneurs en eau. Un tel travail mené avec la sonde NEA, dont on sait que le mode de détection (scintillation Na I et photomultiplicateur) favorise les neutrons épithermiques, semble conduire à la même conclusion (Cabibel).

Lorsque la géométrie de la sonde est modifiée, la courbe d'étalonnage peut être affectée de manière importante. C'est le cas de la sonde Troxler dont la source est en

bout de compteur. La théorie montre que le passage d'une sonde à l'autre est indépendant du type de sol et de la densité sèche, mais que la relation n'est pas linéaire sur toute la gamme d'humidité. Le même type de remarque s'applique pour une modification faible du diamètre du tube : tel est le cas de la sonde Ronly bien que la relation puisse être représentée par une droite dans la plage habituelle des teneurs en eau (Rambal).

Pour interpréter le résultat des mesures en termes de bilans ou d'humidités volumiques, il est donc nécessaire d'étalonner le sol et l'appareil afin de prendre en compte les divers paramètres intervenant dans la réponse de l'humidimètre. Pour cela deux méthodes s'offrent à l'expérimentateur, l'une directe l'autre indirecte. La première consiste à établir une relation entre les valeurs de comptage et celles d'humidité volumique mesurée sur le même emplacement. On effectue les mesures neutroniques le long d'un forage dont on a conservé les échantillons pour une détermination à l'étuve du profil d'humidité pondérale H_p ; on mesure ensuite le profil de densité sèche ρ_s et les valeurs d'humidité volumique obtenues ($H_v = \rho_s \times H_p$) sont mises en corrélation, linéaire dans le cas habituel, avec les valeurs de comptage : on en tire une courbe d'étalonnage spécifique du site analysé. Les protocoles d'étalonnage se distinguent

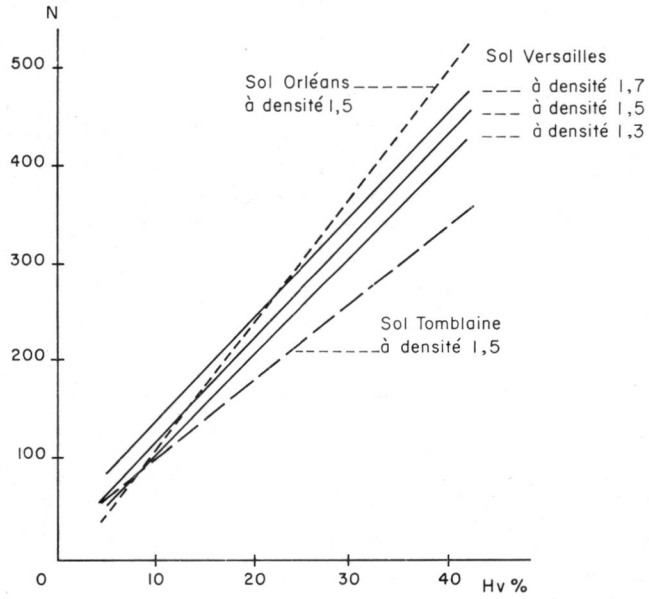


FIG. 7. — *Exemples de courbes d'étalonnage des sols* (d'après Marcesse).
Sol VERSAILLES (30-50 cm) : $N = (1{,}00\ \rho s + 9{,}13)\ Hv + 81{,}6\ \rho s - 103{,}5$

Sol VERSAILLES :

$\rho s = 1{,}7 \quad N = 10{,}8\ Hv + 35$
$\rho s = 1{,}5 \quad N = 10{,}6\ Hv + 19$
$\rho s = 1{,}3 \quad N = 10{,}4\ Hv + 3$

Sol ORLÉANS :

$\rho s = 1{,}5 \quad N = 12{,}9\ Hv - 13$

Sol TOMBLAINE :

$\rho s = 1{,}5 \quad N = 8{,}8\ Hv + 26$

en fait au niveau de la mesure de densité sèche. Luc propose une mesure par le densitomètre à membrane ; les résultats sont bons ($\pm$ 0,6 p. 100 H_v), mais la méthode est plus difficile à appliquer en profondeur. Une autre technique consiste à mesurer ρ_s par une sonde densimétrique dans le même tube que la sonde à neutrons, ce qui est réalisable avec l'appareil NEA (Mériaux, Isberie, Normand, Cosandey). En règle générale, la méthode directe a le mérite d'être assez simple, elle reste néanmoins fastidieuse et sa précision est limitée par la double erreur commise sur H_p (erreur qui peut être faible) et sur ρ_s (qui elle, peut être importante). Enfin les courbes d'étalonnage ne renseignent que sur le site mesuré.

La méthode indirecte tourne en partie le problème tout en permettant une approche plus générale de l'étalonnage. Il a été montré que les coefficients α β γ et δ de la courbe d'étalonnage étaient liés aux constantes Σa et Σd d'absorption et de diffusion des sols vis à vis des neutrons thermiques. Aussi Marcesse propose-t-il de déterminer directement ces constantes : on effectue les mesures sur 300 g d'échantillon de sol dans un bloc de graphite où deux compteurs analysent la perturbation de flux thermique par le sol ; les comptages obtenus permettent le calcul de Σa et Σd, et des courbes d'étalonnage paramétrées en densité ρ_s (fig. 7). Testée sur le dispositif expérimental de la Minière à Versailles, la méthode a donné des résultats satisfaisants (Valancogne). Elle s'est montrée capable de prévoir l'influence pédologique sur les sols de Bretagne (Cosandey).

Pour des sols homogènes à granulométrie fine, les deux méthodes donnent des résultats comparables : cependant la méthode indirecte est plus généralisable en ce sens qu'elle s'applique aux sols lourds, caillouteux et à horizons très différenciés. Elle est par ailleurs peu onéreuse et nécessite un travail expérimental réduit (Thony). De plus, la relation entre la courbe d'étalonnage et les constantes neutroniques permet d'effectuer une prospection rapide des aires d'étalonnage, d'où l'on peut tirer un recoupement des caractéristiques des sols et une prévision des zones où l'on fera éventuellement une confrontation avec la méthode directe (fig. 8).

Conclusion

Nous avons vu l'importance des problèmes d'expérimentation sur les sites de mesure et d'étalonnage des sols pour l'humidimètre dans les études de transferts d'eau en sol nu et sous culture. L'effet de mise en place vise essentiellement à assurer la représentativité de la mesure et l'on se heurte à la forte hétérogénéité inhérente à la distribution de l'eau de pluie ou d'irrigation sous culture. Des solutions nouvelles comme le pal à neutrons ou les tubages horizontaux devraient retenir l'attention des chercheurs. Cependant il importe de ne pas perdre de vue la variabilité intrinsèque des constantes hydrodynamiques des sols. Quoiqu'il en soit la méthode neutronique semble présenter la souplesse d'utilisation nécessaire pour s'adapter aux diverses situations.

L'étalonnage n'apparaît plus comme un obstacle au développement des humidimètres. A la méthode directe, relativement fastidieuse, se substitue la méthode indirecte par détermination des constantes neutroniques des sols ; cette dernière offre un moyen de distinguer le sol en termes de réponse à l'humidimètre. Par contre, la question de la mesure de densité reste posée : notons toutefois que l'imprécision sur ce

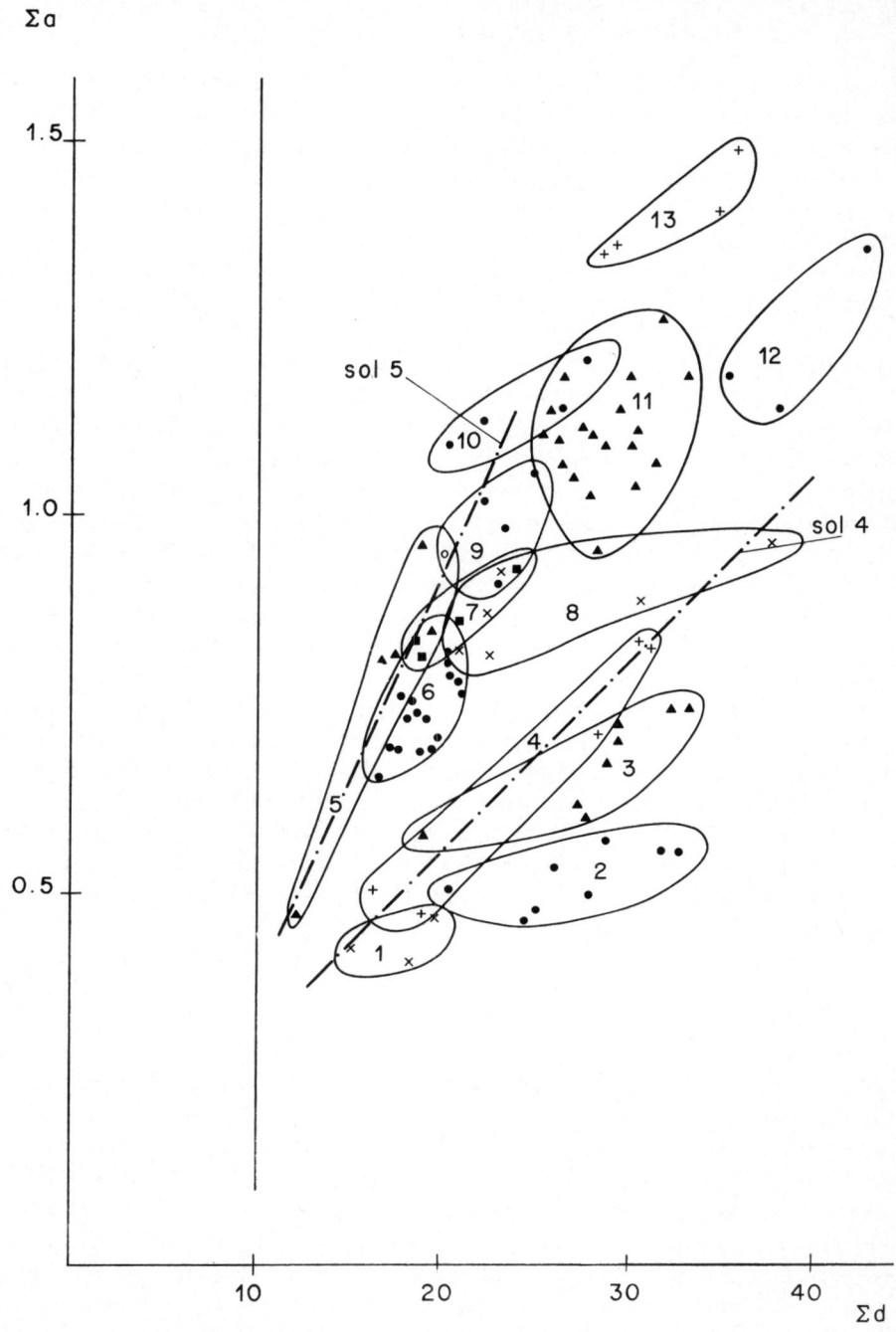


FIG. 8. — *Points images des valeurs de sections efficaces d'absorption et de diffusion pour différents sols* (d'après Marcesse).

1 : ADIOPOUDOUMÉ
2 : GAGNOA
3 : BOUAKÉ
4 : TILLABERY
5 : TARASCON
6 : CADARACHE
7 : GEMBLOUX
8 : LUNEL
9 : GRENOBLE
10 : LA LÈZE
11 : EL KHÉMIS
12 : BEN NACEUR
13 : TOMBLAINE

paramètre a beaucoup moins d'incidence dans le cas de l'utilisation des coefficients de la courbe d'étalonnage calculés à partir des constantes neutroniques des sols que dans le cas (méthode directe) où l'on compare les comptages de la sonde avec l'humidité volumique définie par le produit humidité pondérale — densité sèche.

Soulignons que la méthode neutronique présente un avantage certain sur d'autres types de mesure en ce qui concerne tant la mise en place sur le site où l'accès aux sols caillouteux est possible que la détermination des profils qui peut s'effectuer sur sols lourds et à horizons différenciés. Par ailleurs l'humidimètre à neutrons est l'outil de choix pour étudier les cinétiques de transfert d'eau ; dans ce domaine, le dépouillement des données fournies par un appareil automatique est une application intéressante en hydropédologie.

Pour terminer que pouvons-nous dire des développements de la méthode neutronique ? Il semble bien que nous n'ayons pas encore exploité toute l'information fournie par le flux de neutrons ralentis dans un sol. La détection simultanée des flux de neutrons thermiques et épithermiques est un moyen de mesure de l'humidité indépendant de la densité sèche ; le même type de mesure peut conduire à la détermination *in situ* par une sonde à deux compteurs de la pente de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre. D'autre part nous avons vu qu'il est possible d'effectuer un classement des sols dans le diagramme des constantes neutroniques ; nous avons là un moyen complémentaire rapide de classification des sols à des fins pédologiques.

Citons enfin deux développements assez inattendus de la méthode neutronique : la détection de l'eau deutérée par réaction gamma-neutrons avec une sonde comportant une source γ énergique de Thallium 218 et un détecteur ^3He, qui permet une mesure *in situ* de la dispersion de l'eau dans le tubage même de l'humidimètre ; la photographie *in vivo* sur échantillons de sols au laboratoire du système de racines des plantes par neutronographie.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Methodological and technological bearings of soil moisture neutron meters

By this tentative of synthesis, the author would show the importance of two bearings related to the using of neutron moisture gauge : on one hand, the placing of the experiments which has an effect on the representativity of measurement and leads to solve the problem of soil heterogeneity ; on the other hand soil and neutron moisture meters calibration by several proposed methods. On a third point, the bulk density determination is not yet a solved question but its influence is minimized by indirect calibration.

We emphasize the advantage of neutron moisture meters for stony and heavy soils and also the necessity of their using for the studies of water transport. Finally some informations are given about the development of the neutron method : measurement of soil neutronic constants, roots neutronography, detection of deuterated water by gamma-neutron reaction.

Zusammenfassung

Methodologische und technologische Aspekte der Neutronenmessung der Bodenfeuchtigkeit

In diesem Syntheseversuch bemüht sich der Verfasser, die Bedeutung zweier Aspekte bezüglich der Verwendung von Neutronenfeuchtigkeitsmessern klarzulegen. Es geht einerseits um den Aufbau der Versuche, von der es abhängt, wie repräsentativ die Messung ist, und der das Problem der Heterogenität der Böden lösen soll. In diesem Teil werden Fragen angeschnitten, die die Anzahl der Röhren

und deren Verlegungsmodalität betreffen sowie die Verwendung des Neutronenpfahls, der horizontalen Röhren und der Spezialfall der Oberflächenmessungen. Es geht weiterhin um die Eichung der Böden und der Feuchtigkeitsmesser, wofür zwei Methoden geprüft werden. Nach der Untersuchung der verschiedenen Parameter (Bodentyp, Trockenraumgewicht, Messungsgeometrie), die die Antwort der Feuchtigkeitsmesser bedingen, werden die direkte Eichung mit der üblichen Messung des Wasservolumengehalts und die indirekte Eichung durch Messung der Neutronenkonstanten von Bodenproben analysiert.

РЕЗЮМЕ

Методологические и технологические аспекты нейтронного измерения влажности почв. Куша Ф.

В опыте синтеза, представленном в данной работе, делается попытка выявления важности двух аспектов применения нейтронных влагомеров. С одной стороны-организация экспериментов, обуславливающая показательность измерений и позволяющая разрешение проблемы гетерогенности почв ; к этой части относятся вопросы связанные с числом, труб, способами их введения в почву, применением нейтронного зонда и горизонтальных труб, и, в особенности с измерением поверхности. С другой стороны стоит вопрос об эталонировании почв и влагомеров, и здесь анализирчются два метода : прямое эталонирование с помощью классического измерения об' емной влаги, после рассмотрения различных параметров обуславливающих ответ влагомеров (тип почвы, плотность сухой почвы, геометрия измерений...) и косвенное эталонирование, то-есть измерение нейтронных постоянных в образцах почв.

Ann. agron., 1977, **28** (5), 489-502.

Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols

R. GUENNELON et B. CABIBEL

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Le développement des techniques neutroniques de mesures de l'humidité volumique des sols trouve sa justification dans la diversité des problèmes qui se posent aux agronomes.

La comparaison des mesures réalisées par cette méthode, avec d'autres techniques, en démontre la validité, dans divers dispositifs expérimentaux.

Les auteurs cités dans cet article ont abordé divers problèmes et tenté de les résoudre par de très nombreuses mesures d'humidité par la méthode neutronique, associée ou non à diverses autres techniques comme la tensiométrie ou la densimétrie.

Ils ont étudié ainsi le régime hydrique de sols non irrigués, la morphologie du système racinaire, la mise en valeur de périmètres d'aménagement, le contrôle du drainage, l'exploitation des réserves en eau du sol par les cultures.

De cette analyse portant sur une vingtaine de publications, l'article conclut à l'efficacité de la méthode neutronique grâce à la rapidité des mesures (permettant d'obtenir de nombreux résultats), à la non-destruction relative du sol étudié et à sa précision. Les limitations proviennent, évidemment, du coût de l'appareillage, de la nécessité (en général) d'implantation préalable de tubes de mesure, et du fait que l'utilisation de la sonde à neutrons ne peut seule renseigner sur la disponibilité de l'eau présente dans le sol.

Introduction

L'utilisation de la mesure neutronique de l'humidité des sols se justifie au niveau de l'étude d'un nombre important de problèmes pratiques et théoriques.

L'article de Cabelguenne et Maertens, rappelant dans son introduction l'importance croissante de la bonne utilisation des ressources en eaux, précise que, par suite de l'augmentation constante des surfaces irriguées, « *il devient impératif de choisir des systèmes de cultures et des espèces végétales capables d'optimiser l'utilisation de ces ressources, qu'elles proviennent de l'irrigation ou des réserves du sol* ». La connaissance des « *besoins en eau des cultures et de leurs modalités de consommation* » est donc un objectif primordial.

L'influence du couvert végétal (Delhumeau) ou de la nature des végétaux cultivés (Mériaux, Isberie, Marini *et al.*) est un facteur déterminant de l'évolution du stock d'eau disponible ; les techniques d'irrigation, des plus traditionnelles aux plus sophis-

tiquées, peuvent modifier profondément le mode de gestion de nos ressources immédiatement utilisables.

La sécheresse de l'année 1976 a révélé la fragilité d'un système d'exploitation qui, au cours de son évolution récente, a peut être un peu négligé l'un des facteurs essentiels de la production agricole.

Il importe donc de s'interroger sur les techniques métrologiques permettant de mieux comprendre l'ensemble du problème de l'alimentation en eau des cultures et, plus précisément, d'examiner, au travers des exemples cités lors du « Séminaire sur les applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrogéologie », l'aptitude de cette technique, en voie d'expansion, à résoudre la plupart des problèmes posés aux agronomes, dans ce domaine.

Justification de la méthode neutronique

Il n'est pas nécessaire de revenir sur le principe de l'humidimètre à neutrons pour pouvoir affirmer la validité de cette technique pour la détermination de la teneur en eau des sols en place. Les très nombreuses utilisations qui en ont été faites tant en France qu'à l'Étranger mettent en évidence le fait que la sonde à neutrons permet d'obtenir rapidement un grand nombre de mesures dont la précision est très satisfaisante par rapport aux objectifs que se fixent les utilisateurs. Certes, des problèmes concernant l'étalonnage du matériel nécessitent encore quelques recherches et c'est à ce niveau qu'il faut situer les différences observées lors de l'utilisation simultanée de plusieurs appareils de type différent (Cabibel). Il reste cependant à résoudre de façon plus satisfaisante qu'à l'heure actuelle, les méthodes rapides de mesure des humidités des horizons de surface (parallèlement d'ailleurs à la détermination de la densité apparente de ces mêmes horizons) ; il y a lieu aussi de tenter d'augmenter le « pouvoir de résolution » des appareils utilisés, pour permettre de mieux situer les discontinuités hydriques ou physiques de faibles épaisseurs, susceptibles d'influer notamment, par exemple, sur la circulation de l'eau, en conditions non saturantes.

Néanmoins, dans l'état actuel des choses, les mesures découlant de l'utilisation de la sonde à neutrons sont généralement en bon accord avec celles qui résultent de l'utilisation d'autres techniques. On examinera, à cet égard, le tableau 1 établi par Cabelguenne et Maertens.

TABLEAU 1

Quelques exemples de comparaison de consommation annuelles obtenues par deux méthodes différentes
(d'après M. Cabelguenne et C. Maertens)

	Evapotranspiromètres	Sonde
Tournesol E.T.M.	722 mm 581 mm	740 mm 621 mm
Sorgho E.T.M.	389 mm	406 mm

De même, Cosandey constate que les mesures d'humidité au point de flétrissement et à la capacité de rétention, déduites des mesures faites *in situ* avec une sonde à neutrons, sont en bonne concordance avec les mêmes variables déterminées au laboratoire sur des échantillons prélevés.

Dans un milieu assez différent d'un sol cultivé, (puisqu'il s'agit de granulats destinés à la fabrication d'un béton et stockés en trémies), Baron a étudié un prototype de sonde qui, étalonné sur un matériau déterminé, permet une précision des mesures supérieures à $\pm$ 0,3 p. 100 en valeur absolue sur l'humidité pondérale.

Les travaux rapportés à l'occasion du colloque apportent donc, en général, une confirmation de la validité pratique de l'humidimètre à neutrons, et de son intérêt évident, par rapport à la plupart des autres techniques existantes.

Régime hydrique de sols non irrigués

Au cours de l'été 1976, Cosandey a étudié l'évolution de la réserve en eau d'un sol forestier du Sud-Finistère, grâce à huit sites de mesures implantés sur un petit bassin versant d'une trentaine d'hectares.

Elle a comparé les résultats obtenus par prélèvement direct et par deux méthodes d'étalonnage, l'étalonnage direct sur le terrain par la méthode Gamma-neutronique (Normand, 1973) donnant, en particulier, des résultats en bon accord avec la méthode gravimétrique. Ayant également déterminé, par ailleurs, en laboratoire, les valeurs des humidités pondérales au point de flétrissement, elle a pu mettre en évidence, l'épuisement de la réserve utile dès le 4 août 1976 sur l'ensemble du profil (fig. 1).

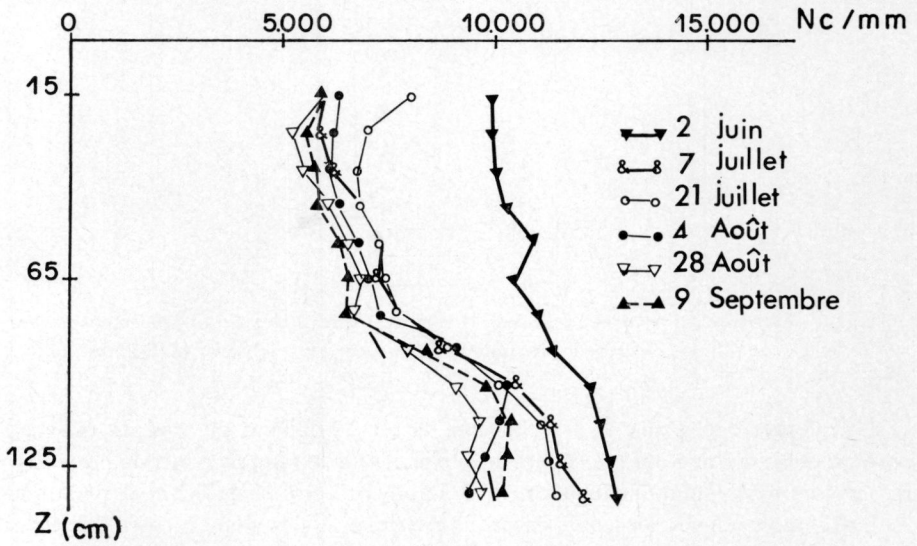


FIG. 1. — *Evolution d'un profil hydrique durant l'été* 1976 (d'après C. M. Cosandey).

C'est par utilisation d'une sonde automatique que Delhumeau a pu étudier dans le nord de la Tunisie, l'influence du couvert végétal sur le régime hydrique de sols bruns lessivés hydromorphes assez hétérogènes à petite échelle et riches en éléments

grossiers. Dans ce cas, les méthodes pondérales auraient été inutilisables pour suivre de manière continue des variations d'humidité. Trois types de couvert végétal ont été étudiés : le maquis originel (AB), le maquis dégradé (C), le peuplement d'eucalyptus (D). L'auteur note des hétérogénéités au niveau d'une parcelle, du même ordre de grandeur que celles qui existent entre deux parcelles correspondant à deux types de végétation différente : l'influence de la végétation réapparaît cependant si l'on considère les couples de courbes-enveloppes (humidité maximale-humidité minimale) correspondant à chacun des couverts végétaux étudiés (fig. 2).

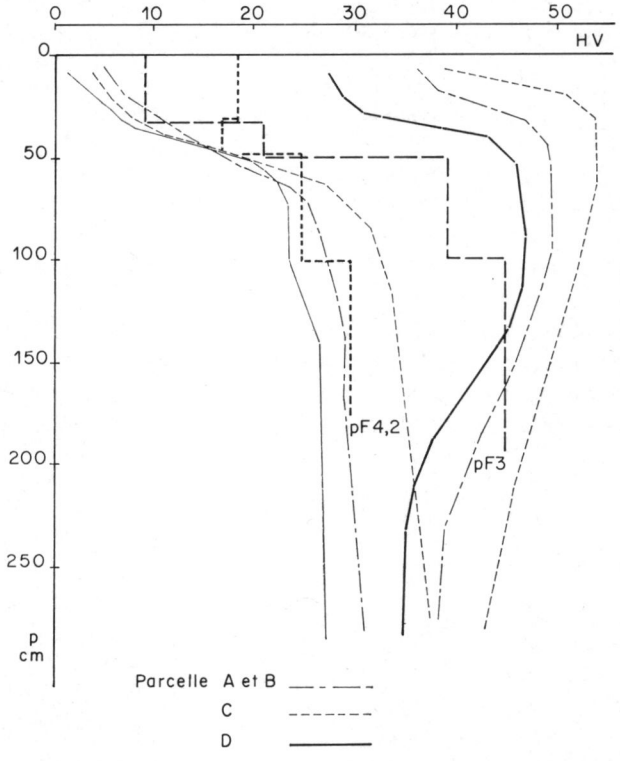


FIG. 2. — *Enveloppe des humidités maximales et minimales enregistrées sur les différentes parcelles* (A et B : maquis — C = maquis dégradé — D = eucalyptus) (d'après M. Delhumeau).

L'évolution des profils hydriques dans le temps dépend du type de couvert, la consommation d'eau étant maximale en surface pour le maquis dégradé, les eucalyptus, par contre, révélant une forte consommation racinaire jusqu'à 2 m de profondeur.

Entre deux relevés successifs de profil hydrique, Delhumeau a calculé la tranche d'eau moyenne journalière rejeté dans l'atmosphère, et, compte tenu des très faibles précipitations, la détermination de l'E.T.R. ainsi réalisée, est apparue comme très inférieure à l'évaporation potentielle selon Turc ou Thornthwaite (fig. 3).

La méthode neutronique a donc permis, dans ce cas, de mettre en évidence les différences dues au couvert végétal, sans perturber le milieu, c'est-à-dire sans en modifier le régime d'écoulement. Elle est donc d'un intérêt très grand pour l'étude

Zusammenfassung

Vorrichtung für die gleichzeitige Messung der Niederschlagsmenge und der Abflussmenge experimenteller Entwässerungsnetze

Eine Vorrichtung für die gleichzeitige Messung der Niederschlagsmenge und Abflussmenge eines Entwässerungsnetzes wird beschrieben : sie besteht aus einem oder mehreren Behältern mit schwingbaren Mulden, die an eine Mehrbahnenschreiber angeschlossen sind. Diese Arbeit gibt eine ausführliche Beschreibung der mechanischen und elektronischen Teile der Vorrichtung und eine kurze Untersuchung ihrer Leistungen.

РЕЗЮМЕ

Техническая Заметка.

Диспозитив для одновременного измерения плювиометрии и режима экспериментальной сети дренажа.

К. ПЕРРЕЙ, А. ВЕРГЕ.

В данной работе описывается диспозитив предназначенный для одновременного измерения плювиометрии и режима сети дренажа, состоящий из нескольких чанов с опрокидывающимися корытцами, связанными с регистратором. Приводятся детали механических и электронных частей аппарата, и кратко анализируются полученные результаты.

Références bibliographiques

DAMOUR L., CAMUS P., GARREAU J., LESAGE B., MEDION H., 1972. Etude de trois systèmes d'assainissement dans les Marais de l'Ouest. *Bull. tech. Inf.*, **273-274,** 1011-1012.

Field Drainage Experimental Unit. Rapports annuels.

GUYON G., 1972. Expérimentation sur le drainage entreprise par le CTGREF à Antony. *Bull. tech. Inf.*, **273-274,** 939-940.

PANIER J., ALLEXANDRELLO E., 1972. Dispositif de mesure du débit des drains dans le périmètre expérimental de Sceaux (Yonne, Terre Plaine). *Bull. tech. Inf.*, **273-274,** 1000-1003.

des bassins versants et pour permettre d'accéder à la détermination de paramètres nécessaires à la caractérisation numérique des modèles tendant à représenter le fonctionnement de telles entités.

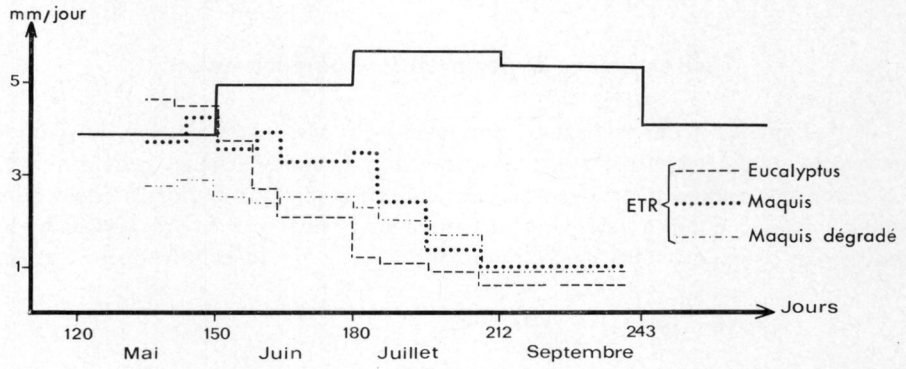


FIG. 3. — *Evolution de l'E.T.P. estimée et de l'E.T.R. mesurée au cours de l'été* 1974 (d'après M. Delhumeau)

Détermination du développement racinaire

Dans certains cas, la méthode neutronique vient en aide à des études morphologiques concernant le système racinaire. Certes, on peut imaginer (et on a utilisé) de nombreuses méthodes permettant de déterminer la localisation des racines d'une plante ou d'une culture. Certaines techniques, utilisant par exemple des radio-éléments ou autres traceurs, tendent à situer la zone de plus grande intensité de l'activité racinaire. Mais dans certains cas, l'examen raisonné de l'évolution des profils hydriques, joint à la connaissance des propriétés physiques du sol, permet d'obtenir facilement un renseignement très satisfaisant à cet égard et même de suivre le phénomène dans le temps, ce qui n'est pas possible avec des méthodes destructrices.

L'intérêt éventuel de la Canne de Provence, comme matière première de la fabrication de la pâte à papier, a conduit Mme Mériaux à étudier les besoins en eau de cette plante et les effets de l'irrigation. Dans la zone étudiée, la nappe, compte tenu de sa profondeur (3,30 à 4,60 m) ne devait pas intervenir dans l'alimentation de la plante, compte tenu de l'enracinement « réputé faible » de cette graminée. Sur des parcelles non irriguées ou différemment irriguées (l'irrigation réalisée correspondant au déficit théorique E.T.P. diminuée des précipitations), on a relevé les profils hydriques deux fois par mois, jusqu'à 400 cm de profondeur, avec un pas de 20 cm.

Sur les sols non irrigués, on a pu relever un dessèchement par translation du profil sur 3 m d'épaisseur aboutissant en septembre au profil au point de flétrissement. La texture du sol étant la même sur tout le profil, l'auteur en tire la conclusion que le système racinaire se développe jusqu'à cette profondeur (300 cm), ce que l'ouverture d'une fosse permet de vérifier. Le rôle de la nappe peut être alors reconsidéré et son influence probable ne permet plus le calcul précis du bilan d'évapotranspiration par le simple examen des profils hydriques.

D'autres travaux récents concernant le développement du système racinaire, ont également fait appel à la méthode neutronique, dans le cadre par exemple de la

disponibilité de l'eau dans un système d'irrigation localisée par microtubes (Cabibel, 1977) ; mais l'interprétation des résultats nécessite parfois l'utilisation de renseignements complémentaires obtenus par d'autres méthodes pour être interprétés en terme de localisation des racines, et même de prélèvement d'eau effectif par les racines.

Mise en valeur de périmètres d'aménagement

Dans l'optique d'une utilisation rationnelle des ressources en eau, la méthode neutronique peut permettre, lors d'une prospection à grande échelle, de déterminer *in situ* les caractéristiques hydrodynamiques ; celles-ci permettront alors de déterminer l'aptitude des sols à l'irrigation. Un tel travail a été réalisé pour la prospection hydropédologique d'un périmètre de 5 000 ha au Niger, pour la culture de la Canne à

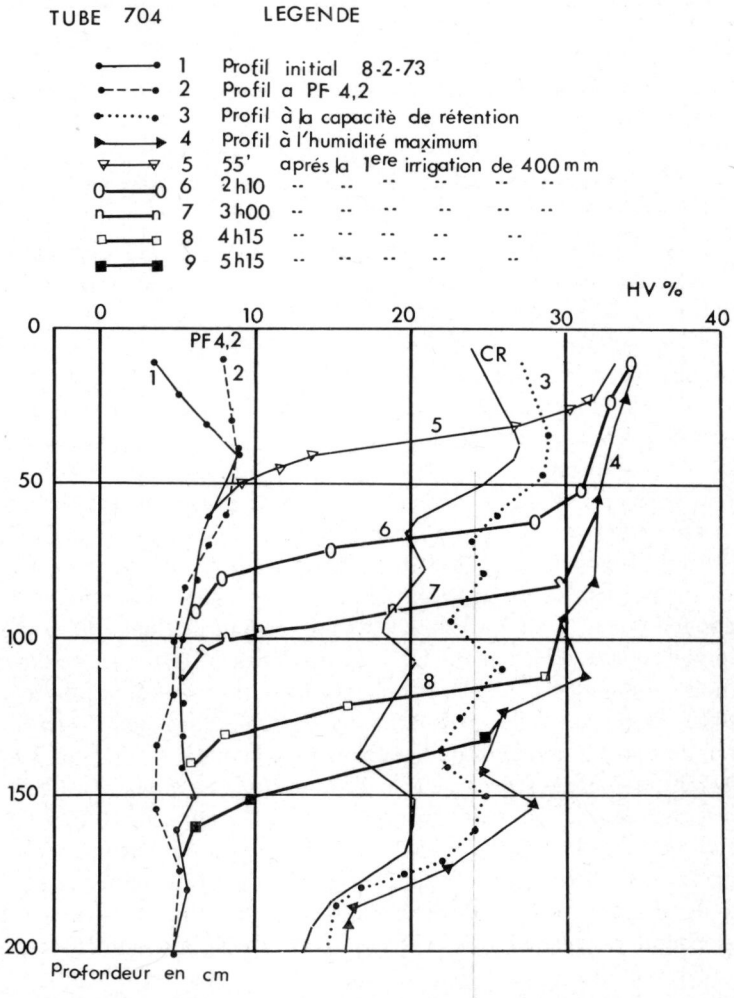


FIG. 4. — *Cinétique d'infiltration et de ressuyage sur un sol brun rouge évolué sur sable éolien* (d'après J. Marcesse et S. Valet).

Sucre par Marcesse et Valet. La méthode a consisté à suivre des cinétiques d'infiltration et de ressuyage à l'aide d'un humidimètre à neutrons à enregistrement magnétique automatique du taux de comptage. La densité apparente a été mesurée à l'aide d'un densimètre gamma à détecteurs G.M. et filtres métalliques.

Le tubage de la sonde est situé au centre d'un double anneau de Müntz délimitant deux bassins (1 m^2 et 4 m^2). La figure 4 donne un exemple des profils relevés. Cinq catégories de sols ont été étudiées correspondant à une trentaine de sites, soumis à plusieurs cycles de cinétique. L'examen des profils permet de mettre en évidence la vitesse du front d'humectation (reliée à la compacité et aux teneurs en argile et en limon). La capacité de rétention peut être déterminée graphiquement sur ces profils en construisant, pour la phase de ressuyage, la courbe Log (Humidité volumique) en fonction du temps. Quant à la réserve utile, elle représente le stock d'eau compris entre le profil à la capacité de rétention et le profil initial sec.

Grâce à une telle étude, on a pu mettre en évidence la nécessité de rejeter pour la culture irriguée de la Canne à Sucre :

— les vertisols à densité élevée, comme trop imperméables,
— les sols peu évolués, non drainants,
— les sols à faciès vertiques à horizon argileux.

Par contre, les sols bruns ou les sols bruns rouges peuvent être retenus sous réserve éventuelle de travaux de sous-solage. Certains sols bien filtrants seront justiciables de l'aspersion ou d'irrigation par distribution localisée.

Comme suite au problème de la prospection des sols et de la détermination de leur aptitude à l'irrigation, Marini *et al.* se sont attachés à celui de la redistribution de l'eau dans le sol en fonction de la distribution spatiale des asperseurs : il s'agit d'ailleurs encore d'un problème concernant l'irrigation de la Canne à Sucre, mais à Madagascar. La méthode proposable pour résoudre un tel problème consisterait à juger de l'homogénéité de la répartition de l'apport d'eau par un réseau de « pluviomètres » : cette façon d'aborder le problème ne tient pas compte des propriétés du sol lui-même, qui pourraient en fait tamponner certaines hétérogénéités dans l'apport de l'eau. Aussi Marini *et al.* ont-ils préféré contrôler directement la répartition de l'eau dans le sol en définissant des mailles d'irrigation, en tenant compte de la végétation, en précisant le nombre de points d'observation permettant de tester l'uniformité du résultat de l'aspersion. Les mesures d'humidité dans le sol ont été effectuées à l'aide d'un *pal à neutrons* (cf. article de Couchat).

La pluviométrie est mesurée de surcroit, en sol nu, par des pluviomètres. La répartition de l'eau a été appréciée par la formule de Christiansen :

$$C.U. = 100 \left(1 - \frac{\Sigma x}{m.n}\right)$$

où C.U. est le coefficient d'uniformité, Σx la somme des écarts entre les valeurs mesurées et la moyenne « m » des « n » mesures.

En sol nu, ce coefficient C.U. est de 92,4 s'il est mesuré par les pluviomètres, de 92,2 s'il est mesuré à l'aide de l'humidimètre à neutrons. Sous Canne à Sucre, ce coefficient tombe à 86,1.

A l'intérieur d'une maille d'aspersion de 18 m × 18 m, si l'uniformité de l'apport d'eau est bonne, il reste cependant une hétérogénéité ponctuelle ou zonale ; alors

qu'en sol nu, on peut estimer l'apport moyen d'eau à l'échelle de la maille par une mesure dans une seule sous-maille centrale de 3 m × 3 m, sous Canne à Sucre, il faudra utiliser au moins huit points situés en des emplacements précis à l'intérieur de la maille principale.

Contrôle du drainage

Grâce à l'établissement de profils hydriques à l'humidimètre à neutrons et à des mesures complémentaires de tension capillaire, il est possible de juger de l'efficacité d'un drainage et de prévoir son comportement. Ces études permettent de préciser les périodes climatiques où le drainage, donc le lessivage, seront les plus intenses, notions qui présentent un intérêt primordial non seulement au sujet des potentialités des sols, mais aussi eu égard aux risques d'entraînement de substances solubles dans les nappes.

Dans le système étudié par Mme Mériaux, Lavielle et Perrey, dans le cadre d'une étude sur le drainage des sols lessivés de l'Auxois (Côte d'Or), on peut s'apercevoir que l'écoulement est nul (sauf en cas de précipitations abondantes) durant la phase de réhumectation jusqu'à 0,65 m de profondeur ; l'écoulement est faible et proportionnel aux pluies lorsqu'elles dépassent 15 mm par semaine, sans que le profil hydrique soit modifié, entre deux stades de réhumectation. Lorsque le profil est réhumecté sur 1,25 m (avec engorgement à 0,60 m), il y a écoulement maximum à peu près égal aux précipitations, tant que l'E.T. est faible. L'analyse de la réhumectation par la sonde montre que le profil hydrique se réorganise, à partir de la courbe la plus sèche, pour une profondeur de 0,60-0,70 m (augmentation de la réserve de surface) et le déplacement latéral du profil entre 0,7 et 1,20 m traduit l'établissement de l'équilibre du régime de drainage (fig. 5).

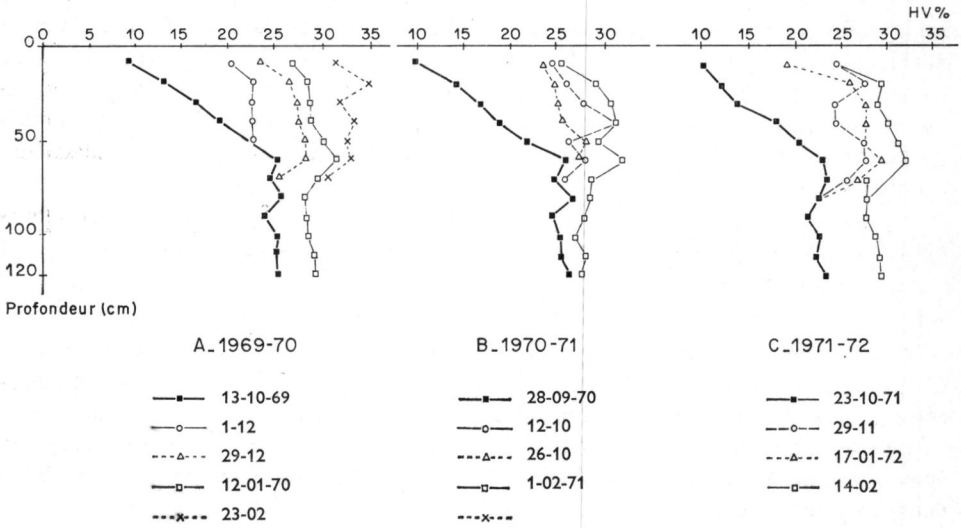


FIG. 5. — *Réhumectation d'un profil hydrique sec* (d'après S. Mériaux).

Exploitation des bilans hydriques en sols cultivés

Les utilisations présentées aux paragraphes précédents pouvaient être considérées comme préliminaires à l'implantation d'un système d'irrigation ou même être étrangères à cette préoccupation. C'est cependant dans le domaine du contrôle de l'alimentation en eau des végétaux cultivés que l'humidimètre à neutrons trouve son plus vaste domaine d'application.

Isberie a étudié l'évolution de profils hydriques sur verger irrigué par un système d'apport d'eau localisé. L'eau est apportée dans des rigoles situées au milieu des interlignes, séparées par des biefs de 5 m de longueur, les rigoles communiquant les unes aux autres par des ajustages. L'expérimentation poursuivie avait pour but d'ajuster l'optimum du rationnement en eau au moyen de trois traitements représentant 30, 50 et 100 p. 100 de l'E.T.P.

L'humidimètre utilisé est mixte (humidimètre et densimètre) et les déterminations de la densité humide et de l'humidité permettent, après étalonnage du site de mesure, d'obtenir les profils hydriques en humidité volumique ou en humidité pondérale.

En relevant les profils hydriques pendant cinq mois (d'avril à septembre), on observe un dessèchement régulier qui, pour les tubages réalisés sur la ligne d'arbres, indique que l'irrigation n'a pas maintenu, à cet endroit, l'état hydrique du sol au niveau de l'humidité maximum de début de saison. Ceci peut être dû à une diffusion latérale faible, à partir de la rigole, dans un tel type de sol très sableux ; on peut aussi relier cet assèchement important du profil à une activité racinaire intense, même au niveau de la rigole : l'examen des profils conduit donc à modifier le système et les modalités d'irrigation mis en place, compte tenu d'un effet négatif sur la végétation. On notera, par ailleurs, que les mesures densimétriques réalisées permettent d'établir une bonne corrélation (négative) avec la teneur en sable.

La possibilité de réaliser des profils hydriques pendant une longue période, de façon rigoureuse, sur le même emplacement, a permis à Puech et Hernandez de réaliser l'étude des bilans hydriques pluriannuels sur des rotations culturales en présence ou non d'irrigation ; grâce au dispositif utilisé, ils ont étudié une dizaine de rotations, sur lesquelles ils ont envisagé, entre autres choses, l'évolution de la dessication totale du sol, la durée de maintenance des sols à la capacité au champ, l'estimation du drainage.

La dessication totale des sols a été étudiée de 1969 à 1974 sous une rotation Maïs-Maïs et sous une rotation Ray-grass et Trèfle violet-Sorgho-Blé. Dans le premier cas, le dessèchement atteint et même dépasse 200 mm en non irrigué et environ 100 mm en irrigué lors de la phase de grossissement du grain. Le relevé du profil neutronique permet de mettre en évidence le retard, plus ou moins important, entre le maximum de l'E.T.P. (fin juin-début juillet) et le maximum de l'assèchement du profil, plus étalé sur août-septembre-octobre. Dans les sols peu profonds non irrigués, comme dans les sols irrigués, le remplissage total du profil et le début du drainage sont précoces, du fait du faible niveau de la réserve utile dans un cas, de la faible participation des réserves dans l'autre cas.

La méthode neutronique peut, en l'absence de tensiomètres, permettre d'évaluer les époques et la durée de maintenance des sols à leur capacité au champ (intérêt

quant aux dates d'accessibilité des engins). On peut mettre ainsi en évidence l'influence de l'irrigation et celle du type de culture (tabl. 2). Les auteurs ont également interprété les mesures d'humidité neutronique pour dégager l'influence des rotations sur le drainage (tabl. 3). La même méthode permet de déterminer rapidement les dates de la première et de la dernière phase d'irrigation. Si la mesure de l'humidité facilite la première décision d'irrigation, l'arrêt définitif doit tenir compte (pour ne pas être trop précoce) des conditions climatiques probables pour lesquelles les exigences de la culture sont compatibles avec la réserve existante et l'intensité de son évolution (estimation du rapport E.T.M./E.T.P.).

TABLEAU 2

Nombre moyen de jours par an où le sol a été à la capacité au champ pour trois types de rotations (de juin 1969 à septembre 1974)

I = irrigué NI = non irrigué

(d'après J. Puech et M. Hernandez)

	Maïs-Blé		Maïs-Blé		Ray-Grass Trèfle violet Sorgho-Blé	
	NI	I	NI	I	NI	I
Nombre de jours/an...	114	172	81	96	54	76

TABLEAU 3

Evaluation du drainage annuel moyen (1969/1974) sous divers systèmes de cultures irriguées (I) ou non (NI) en région toulousaine

(d'après J. Puech et M. Hernandez)

	Maïs-Blé		Maïs-Blé		Ray-Gras Trèfle violet Sorgho-Blé	
	NI	I	NI	I	NI	I
Drainage moyen (mm).	106	170	55	75	11	47

Le travail de Puech et Hernandez comporte une discussion sur la méthode neutronique dont les conclusions sont très positives en dépit de quelques restrictions : celles-ci se situent, par exemple, au niveau des systèmes hétérogènes, tant du point de vue texture du sol que du point de vue des circulations préférentielles (nappes, veines de circulation, fentes de retrait, etc...).

Par des démarches analogues, Cabelguenne et Maertens ont étudié d'un point de vue dynamique l'utilisation des réserves du sol par des cultures à enracinement progressif (cultures annuelles) et par des cultures à enracinement permanent (plantes pérennes des prairies). Dans le premier cas, on peut mettre en évidence par l'examen

des profils hydriques, la progression du système racinaire et de l'assèchement du profil (fig. 6). Les résultats expérimentaux révèlent un comportement analogue pour les plantes pérennes, bien que les racines âgées d'un an aient déjà colonisé le profil, ce qui implique que l'absorption s'effectue « *préférentiellement à partir des horizons de surface dans la mesure où l'eau est uniformément disponible* ». On peut donc déterminer le stade de dessication à ne pas dépasser selon les espèces végétales considérées. Dès lors, l'introduction de l'irrigation, qui affecte surtout les horizons de surface, ne favorisera pas l'utilisation des réserves de profondeur qui correspondront donc à des stockages abusifs : « *l'importance de participation des réserves hydriques du sol diminue avec l'irrigation et, d'autant plus, que celle-ci est abondante* » (*auteurs cités*). Cabelguenne et Maertens concluent donc, comme les précédents, à l'importance de la date de la dernière irrigation, car c'est elle qui permettra l'exploitation de ces réserves.

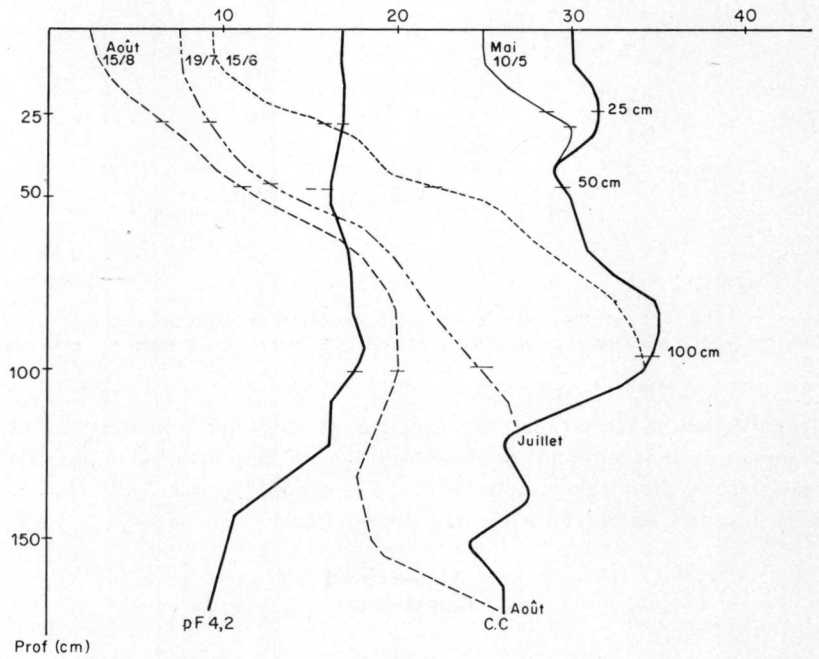


FIG. 6. — *Evolution de profils hydriques sous maïs non irrigué* (d'après M. Cabelguenne et C. Maertens).

Le problème de la notion de disponibilité (Réserve Utile = R.U.) doit être envisagé différemment selon qu'il s'agit d'un régime irrigué ou non ; dans le premier cas, l'épuisement de cette réserve, déterminée par humidimétrie à neutrons (capacité au champ) et par des méthodes de laboratoire (humidité à pF = 4,2), doit être contrôlée régulièrement, ce qui permet de déclencher l'irrigation lors de l'atteinte d'un seuil exprimé par rapport à la R.U., selon les modalités de consommation par la culture.

Dans le second cas, en régime de non-irrigation, la courbe correspondant à la capacité au champ reste le point de départ de la dessication ; la courbe correspondant au point de flétrissement pourrait être dépassée en surface, mais ne devrait jamais

être atteinte en profondeur : cette constatation aboutit à reconsidérer la notion de R.U. calculée qui doit faire entrer en ligne de compte la possibilité d'exploitation d'un profil dont certains niveaux sont tombés en dessous du point de flétrissement (fig. 7).

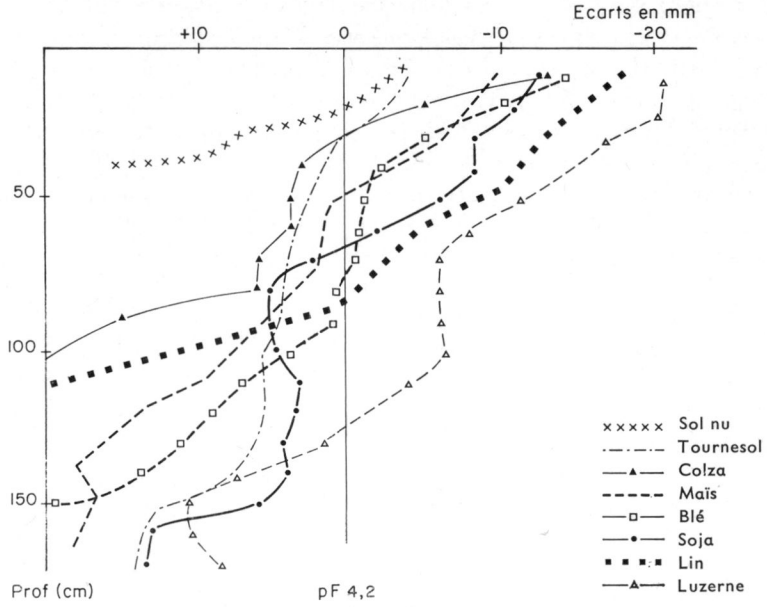


FIG. 7. — *Ecarts d'humidité en millimètres des profils en dessication maxima sous différentes cultures par rapport au profil hydrique à pF* 4,2 (d'après M. Cabelguenne et C. Maertens).

L'exploitation de nombreuses données concernant l'humidité des sols, réparties en profondeur et dans le temps, données dont l'acquisition est rendue possible par la sonde à neutrons, établit donc nettement que le concept de R.U. calculée n'a pas la même signification en présence ou non d'irrigation.

Conclusion

Cette synthèse qui s'appuie sur une dizaine d'articles cités en référence, n'a pour but que de mettre en évidence la diversité des problèmes que l'humidimètre à neutrons peut permettre de résoudre, associé ou non à d'autres méthodes. Certes, depuis une quinzaine d'années, cette technique a connu une vogue sans cesse croissante. En France cependant, on ne dénombre actuellement qu'une cinquantaine de sondes en service (certaines ayant plus de 10 ans d'âge) ; la quasi-totalité de ces instruments appartiennent à des organismes de Recherches (Universités, I.N.R.A., C.E.A.) ou des Compagnies d'Aménagement. La méthode neutronique est donc encore bien loin d'être d'un usage courant dans la pratique, dans les exploitations agricoles de quelque importance qu'elles soient. Bien qu'opérationnelle, elle reste un instrument de recherche, permettant de mettre au point des modèles d'alimentation en eau des cultures, livrables aux praticiens et adaptés aux paramètres multiples que représentent le sol, le climat, la plante, le type d'exploitation, les ressources en eau disponibles, etc...

L'établissement de ces modèles ne peut se concevoir sans l'acquisition d'un très grand nombre de données, ce qui justifie l'utilisation d'un appareillage relativement onéreux et dont l'emploi fréquent requiert certaines précautions élémentaires. La sonde à neutrons ne fait que fournir des taux d'humidité volumique (l'étalonnage étant supposé correctement réalisé) que des techniques (de prélèvements par exemple) permettraient elles aussi d'acquérir ; mais elle le fait avec la garantie offerte par la possibilité de nombreuses répétitions de mesures non destructives *in situ*. Par sa conception même, elle ne peut souvent pas seule résoudre certains problèmes et dans ces domaines n'apporte rien de plus que les méthodes traditionnelles : un intérêt supplémentaire provient de ce que son ensemble détection-comptage peut, grâce à une source de rayonnement gamma, constituer un instrument de mesure de la densité apparente des sols en place, critère particulièrement intéressant pour l'examen de l'état structural ; bien que controversée dans son principe de mesure, cette information complémentaire acquise renforce l'intérêt de la méthode neutronique.

La sonde à neutrons seule ne peut renseigner, de façon certaine, sur le sens des déplacements de l'eau, et l'exploitation correcte des données recueillies, quant à la connaissance de la conductivité hydraulique et des flux, nécessite l'emploi simultané des tensiomètres ou des psychromètres.

L'état hydrique d'un sol étant le résultat d'un grand nombre de facteurs, la mesure précise de l'humidité est une caractéristique intégrante, permettant de bien cerner les modalités d'utilisation des réserves en eau. Dans un contexte où la notion d'économie et de rentabilité de l'eau prend chaque jour plus d'importance, l'humidimétrie à neutrons est un outil satisfaisant, permettant d'aborder et de résoudre de nombreux problèmes. Les limitations de son utilisation sont moins souvent liées à ses performances techniques propres qu'à la complexité des phénomènes régissant les interactions de l'eau et du milieu dans lequel on doit l'utiliser.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Diverse applications of the neutron method of humidity measuring for the control and utilization of the hydrous reserves of soils

The development of the neutron techniques of measuring the voluminal humidity of soil is justified by the diversity of problems presented to agronomists.

The comparison of the measures carried out by this method with those by other techniques proves its validity in various experimental devices.

The authors quoted in this article approached different problems and tried to resolve them with a great number of humidity measurements by the neutron method, partially associated with some other techniques like the measurement of the surface tension of liquids or densimetry.

So they studied the water regime of non irrigated soils, the morphology of the root system, the development of arranged areas, the drainage control, the utilization of the water reserves in the soil by the crops.

This analysis of about twenty publications leads to the following conclusion of the article : the neutron method is efficacious owing to the rapidity of measurement, allowing to obtain numerous results. It works pricesely and, relatively, does not destroy the studied soil.

The limitations are obviously connected with the cost of the apparatus, with the general necessity of previous installations of the measurement tubes and with the fact that the utilization of neutron sounding only cannot inform of the available water present in the soil.

Zusammenfassung

Verschiedene Anwendungen der Methode neutronischer Feuchtigkeitsmessung zur Kontrolle und zum Gebrauch der Wasserreserven im Hoden

Die Entwicklung der neutronischen Messungstechniken des Feuchtigkeits-volumens im Boden findet ihre Berechtigung in der Verschiedenheit der Probleme, die sich für den Landwirt ergeben.

Der Vergleich der Messungen, die an Hand dieser Methode durchgeführt wurden, mit anderen Techniken erbringt deren Gültigkeitsbeweis in verschiedenen experimentellen Vorrichtungen.

Die in diesem Artikel genannten Autoren haben verschiedene Probleme angeschnitten und sie zu lösen versucht, und zwar durch sehr zahlreiche Feuchtigkeitsmessungen mit der Neutronenmethode alleine oder in Verbindung mit verschiedenen anderen Techniken wie der Tensiometrie oder der Densimetrie.

Sie haben also den Wasserhaushalt unbewässerter Böden untersucht, die Morphologie des Wurzelsystems, die Aufwertung bewirtschafteter Umkreise, die Kontrolle über die Entwässerung und die Verwertung der Wasserreserven im Boden durch die Kulturen.

Diese Analyse, die auf etwa 20 Veröffentlichungen zurückgreift, unterstreicht als Schlussfolgerung des Artikels die Wirksamkeit der Neutronenmethode dank der Geschwindigkeit der Messungen (die zahlreiche Ergebnisse ermöglicht) sowie ihre Genauigkeit und die Tatsache, dass der untersuchte Boden relativ nicht zerstört wird. Einschränkungen entstehen jedoch auf Grund der Kosten für die Vorrichtung, der im allgemeinen vorher erforderlichen Verlegung der Messungsröhren sowie durch den Sachverhalt, dass die alleinige Anwendung der Neutronensonde nicht über die im Boden vorhandene, verfügbare Wassermenge Aufschluss geben kann.

РЕЗЮМЕ

Различные применения метода нейтронных влагомеров для контроля и использования водных запасов почв.

Геннелон Р., Кабибель Б.

Развитие технологии нейтронного измерения об'емной влажности почв находит свое оправдание в разнообразии проблем стоящих перед агрономами.

Сравнение результатов измерений произведенных с помощью этого метода с разными другими техническими приемами измерений, доказало законность его применения в различных экспериментальных предприятиях.

Авторы, цитируемые в данном труде, пытались разрешить самые разнообразные проблемы с помощью многочисленных измерений влажности одним только методом нейтронных влагомеров, или тем-же методом, но в комбинации с некоторыми другими технологиями, как например тенсиометрия и денсиметрия.

Изучались ими также водный режим неорошаемых почв, морфология корневых систем, освоение периметров планировки, контроль дренажей и использование водных запасов почв культурами.

Анализ около двадцати цитируемых публикаций позволил провести общее заключение об эффективности нейтронного метода ввиду быстроты измерений (позволяющей получение многочисленных результатов), относительно хорошей сохранности почвы и точности полученных данных. Применение метода ограничено, конечно, стоимостью аппаратуры, необходимостью (чаще всего) предварительного введения в почву труб для измерений, а также тем фактом, что один только нейтронный зонд не может сам по себе доставить сведения о наличности влаги находящейся в почве.

Référence bibliographique

(à l'exclusion des communications présentées au Séminaire)

CABIBEL B., 1977. Influence du mode d'irrigation sur la structure et le fonctionnement du système racinaire de jeunes pommiers. *C. R. Acad. Agric. Fr.* (à paraître).

Ann. agron., 1977, **28** (5), 503-519.

La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique

F.A. DAUDET * et G. VACHAUD **

* *Station de Bioclimatologie,*
Centre de Recherches de Versailles, I.N.R.A.,
78000 Versailles

** *Institut de mécanique,*
Laboratoire Associé au CNRS, n° 6
BP 53, 38041 Grenoble Cedex

Résumé

Partant des variations de stock d'eau ΔS, sur la profondeur de sol 0-z, mesurées par l'appareil à neutrons, il est possible de déterminer l'un des deux termes du bilan, l'évapotranspiration ETR ou le flux φ_z, si l'autre terme est directement mesuré.

Différentes méthodes sont passées en revue et le problème d'échantillonnage est discuté.

I. — Introduction

Depuis la mise au point et la vulgarisation de la méthode neutronique nombreux sont les expérimentateurs qui l'utilisent dans des domaines très variés (agronomie, hydrologie, travaux publics...). Parmi les communications présentées à Cadarache portant plus ou moins directement sur la détermination du bilan hydrique, c'est-à-dire sur l'évaluation des différents flux qui sont à l'origine des variations du stock d'eau du sol (évapotranspiration, drainage...), l'éventail des objectifs est encore assez vaste et reflète bien la diversité des applications de la méthode neutronique. Citons par exemple :

— Bilan hydrique en sec (Cosandey, Daudet *et al.*, Rambal).

— Bilan hydrique en périmètre irrigué (Chambon, Isberie, Moutonnet, Peyremorte, Puech et Hernandez...).

— Bilan hydrique en périmètre drainé (Normand *et al.*).

— Entraînement des éléments minéraux vers les nappes (Bonnet *et al.*).

— Ecoulements hypodermiques dans les formations de pente (Livet).

Les résultats confirment dans l'ensemble l'intérêt de la mesure neutronique de l'humidité des sols pour aborder de tels problèmes. Il faut toutefois souligner que pour certains d'entre eux, les réponses apportées ne sont pas satisfaisantes ou trop partielles, soit que les dispositifs expérimentaux aient été inadéquats, soit que les méthodes actuellement existantes ne permettent pas d'aborder correctement ces problèmes.

Les difficultés les plus grandes se rencontrent dans les sols où des nappes existent plus ou moins temporairement ou encore lorsque des irrigations massives conduisent à des états voisins de la saturation. En effet, les risques sont alors très grands de voir apparaître des zones d'écoulement rapide, réparties de façon très hétérogène dans le sol (fissures, galeries...). Le calcul du bilan hydrique est dans ces conditions extrêmement difficile.

Pour les mêmes raisons (horizons saturés donc transferts rapides sans variation importante de la teneur en eau, possibilités de transferts latéraux...), les études en parcelles drainées n'aboutissent que difficilement à un bilan hydrique dans le plein sens du terme.

La situation se complique encore lorsque les terrains ne sont pas horizontaux ce qui implique une composante latérale importante des transferts d'eau (drainage oblique) en cas de saturation (ex. article de Livet). Le calcul d'un véritable bilan hydrique est alors quasiment impossible à l'aide des méthodes courantes. Les informations de tension et de niveau piézométrique deviennent indispensables pour connaître le sens des flux mais leur intensité restera encore difficile à préciser.

Un autre cas très difficile est celui des sols fissurés. La technique neutronique est alors mal adaptée par suite de médiocres contacts sol-tubage qui pourront fausser localement les mesures. Par ailleurs, les transferts d'eau qui se développent dans ces sols sont fondamentalement hétérogènes et tri-dimensionnels. La réhumectation en période pluvieuse peut en particulier atteindre très rapidement les couches profondes du sol s'il y a ruissellement dans les fissures. Pour peu que les tubes d'accès neutroniques aient été installés dans des emplacements non fissurés, les pluies pourront sembler n'apporter que des quantités d'eau dérisoires (cf. Bonnet *et al.*).

Le domaine où le calcul du bilan hydrique peut s'opérer dans les conditions les plus satisfaisantes reste donc celui des sols horizontaux ne présentant pas de phénomènes de gonflement-retrait et généralement dépourvus de nappes. La mesure neutronique paraît alors particulièrement bien adaptée au problème posé, bien que le besoin se fasse sentir d'une méthode plus rapide, plus ponctuelle et surtout plus appropriée à l'étude des horizons superficiels du sol.

II. — Principe de la mesure

Rappelons que l'humidimètre à neutrons fournit directement une mesure de l'humidité *volumique* du sol à l'intérieur d'une « sphère d'influence » d'environ 30 à 50 cm de diamètre. A partir de cette mesure, on peut sans difficulté particulière de principe calculer la quantité d'eau présente dans une tranche de sol donnée. Cette grandeur, exprimée en hauteur d'eau est généralement définie comme le stock compris entre deux niveaux de référence.

Par la possibilité qu'elle offre de répéter cette mesure en un même emplacement à des dates quelconques, la méthode neutronique est apparue pendant quelques années comme susceptible de résoudre à elle seule les problèmes de contrôle des divers éléments du bilan hydrique et notamment l'évapotranspiration réelle des cultures.

En fait, cette mesure neutronique ne permet en toute rigueur que d'accéder à la connaissance du stock instantané S ou des variations ΔS du stock d'eau contenu dans le

sol. Elle permet d'ailleurs de le faire beaucoup plus commodément et précisément que la méthode pondérale classique du fait notamment que n'étant pas destructive, les points de mesure sont fixes au cours du temps, ce qui réduit les erreurs d'échantillonnage.

Pour une période quelconque de durée Δt l'équation du bilan hydrique peut s'écrire :

$$[\Delta S]_0^z = P + I \pm r - ETR - \bar{\varphi}_z . \Delta t \qquad (1)$$

$[\Delta S]_0^z$ = variation de stock d'eau sur l'épaisseur z de sol.

$P + I$ = somme des pluies et de l'irrigation.

$\pm r$ = apport par ruissellement (positif ou négatif).

ETR = évapotranspiration réelle.

$\bar{\varphi}_z$ = flux d'eau moyen à travers la cote z. Si l'on oriente Oz vers le bas, ce flux sera compté positivement dans ce sens, c'est-à-dire en cas de drainage.

A part $\bar{\varphi}_z$ qui a une dimension de vitesse, tous les termes de cette équation ont une dimension de longueur (volume par unité de surface).

Cette équation simple montre que même si le ruissellement est nul, la connaissance seule de $[\Delta S]_0^z$ et de $P + I$ ne permet pas de calculer ETR si $\bar{\varphi}_z . \Delta t$ n'est pas connu. L'importance de ce dernier terme est d'ailleurs très variable selon les conditions de sol rencontrées, la profondeur z considérée et l'époque de l'année.

Lorsque $\bar{\varphi}_z$ est faible vis-à-vis des autres flux, l'erreur encourue sur ETR peut paraître parfaitement négligeable et cela explique que l'on ait longtemps pu aller jusqu'à oublier l'existence de ce terme. On notera cependant qu'un faible flux sur de longues périodes peut donner des volumes écoulés relativement importants. Ceci explique le souci actuel des agronomes et des hydrologues de mieux contrôler le devenir de l'eau du sol pendant tout le cycle annuel et dans des conditions pédologiques et topographiques variées en développant des méthodes capables de prendre en compte toutes les composantes du bilan hydrique et en particulier de lever l'indétermination sur $\bar{\varphi}_z . \Delta t$. Les dispositifs expérimentaux conçus dans ce sens utilisent toujours l'humidimètre à neutrons mais une information complémentaire en termes de flux est recherchée, soit par une mesure directe de l'évapotranspiration réelle (cuves lysimétriques pesables ou méthode du bilan d'énergie), soit par la mise en œuvre de mesures tensiométriques appropriées qui permettent de calculer $\bar{\varphi}_z$.

Le problème de la précision sur la mesure des variations de stock d'eau obtenues avec l'humidimètre à neutron préoccupe évidemment la plupart des expérimentateurs. Les erreurs liées aux incertitudes provenant des méthodes d'étalonnage, doivent à coup sûr être prises en compte pour estimer cette précision. Il faut cependant noter que même si un appareil donne une mesure absolue assez imprécise (mesurer par exemple la teneur en eau avec une erreur de $\pm$ 0.02 cm^3/cm^3), la mesure relative peut être plus précise. Il est de ce fait difficile d'estimer avec quelle précision on peut déterminer une variation de stock sur une verticale bien qu'une précision relative supérieure à 5 p. 100 semble illusoire. Ce point est cependant secondaire par rapport aux hétérogénéités de toutes sortes que l'on trouve dans le sol, hétérogénéités qui influeront tant sur la représentativité des mesures sur une verticale (obtention des courbes d'étalonnage propres à chaque couche, influence des effets d'interface) que surtout sur l'extrapolation à des parcelles ou à des bassins versants, des mesures ponctuelles obtenues dans un tubage. Cela reste encore actuel-

lement l'obstacle majeur de l'obtention de bilans représentatifs sur une grande échelle (depuis une dizaine de m² jusqu'à plusieurs centaines d'hectares).

Nous chercherons ici à analyser, en nous appuyant autant que possible sur les communications présentées à Cadarache, les difficultés inhérentes à la détermination des diverses composantes du bilan hydrique. Les deux points suivants seront abordés dans l'ordre :

— la mesure neutronique des variations de stock d'eau du sol,

— l'interprétation de ces mesures dans la perspective du bilan hydrique.

III. — La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations

1. — *Détermination du stock d'eau du sol*

Rappelons que chaque comptage neutronique Ni après avoir été rapporté à un comptage de référence No obtenu par exemple dans l'eau est ensuite transformé en valeur d'humidité volumique θi moyennant une relation d'étalonnage linéaire :

$$\theta i = Ai \frac{Ni}{No} - Bi. \tag{2}$$

Ai et Bi, coefficients de la droite d'étalonnage au niveau i, dépendent de la composition chimique du sol et de sa masse volumique.

L'évaluation du stock d'eau S contenu dans le sol entre la surface et la profondeur maximale de mesure z peut être obtenue par simple sommation sur les n niveaux considérés :

$$[S]_0^z = \sum_{i=1}^{n} \theta i . \Delta z_i. \tag{3}$$

Dans le cas de niveaux de mesure équidistants, les Δz_i sont identiques entre eux et égaux à l'équidistance de ces niveaux.

A l'intérieur de la « sphère d'influence », ce sont les points du sol les plus rapprochés de la sonde qui ont le plus grand poids dans la valeur finale du comptage. Beaucoup d'expérimentateurs font une exploration des tubes neutroniques par pas de 10 cm, ce qui compte tenu des dimensions de la sphère d'influence implique une certaine redondance entre les comptages. L'expérience montre que ce surcroît d'information est souvent utile, mais la mesure est de toute façon entachée d'erreurs en cas de variation brutale de la teneur en eau à l'intérieur de la sphère d'influence (front d'infiltration, hétérogénéité du sol...).

Un des points faibles de la méthode neutronique concerne la mesure dans les tranches supérieures du sol (0 à 20 cm) dont l'importance est considérable dans le bilan hydrique.

2. — *La mesure des variations de stock d'eau du sol*

Grâce au tube d'accès placé à demeure dans le sol, la mesure neutronique peut être répétée dans le temps sur le même échantillon de sol. C'est là un des principaux avantages de cette méthode.

Considérons deux comptages neutroniques Ni_1 et Ni_2 effectués à deux dates différentes au même emplacement pour deux humidités θi_1 et θi_2.

D'après l'équation (1), le calcul de la variation d'humidité au niveau i entre les deux dates considérées vaut :

$$\Delta\theta i = \theta i_2 - \theta i_1 = Ai \left(\frac{Ni_2}{No_2} - \frac{Ni_1}{No_1} \right) \quad (4)$$

ce qui ne fait intervenir que la pente Ai de la droite d'étalonnage.

Or celle-ci est en général mieux connue que l'ordonnée à l'origine Bi. On peut en conclure que la précision de la méthode neutronique sera meilleure sur les variations d'humidité que sur l'humidité elle-même.

La même conclusion s'applique évidemment au stock total du profil jusqu'à la cote z, puisque :

$$\Delta S_z = S_{z,2} - S_{z,1} = \sum_{i=1}^{n} A_i \left(\frac{N_{i,2}}{N_{i,0}} - \frac{N_{i,1}}{N_{0,1}} \right) \Delta z_i \quad (5)$$

sera connu avec une meilleure précision que les valeurs exactes $S_{z,2}$ et $S_{z,1}$.

Pour tous les problèmes de bilan hydrique, c'est donc essentiellement à la détermination de la valeur des pentes Ai que l'on s'attachera lors de l'étalonnage. Etant donné la grande amplitude des variations d'humidité dans les horizons superficiels, une source d'erreur importante dans l'estimation des variations de stock peut provenir d'un mauvais étalonnage de la sonde au voisinage de la surface. Il faut donc apporter le plus grand soin à l'étalonnage dans ces horizons, car la valeur de la pente y est très différente de celle que l'on obtient en profondeur.

3. — *Echantillonnage des parcelles pour la mesure des variations de stock d'eau*

Une fois l'humidimètre étalonné, l'établissement d'un bilan hydrique pose — comme toute mesure faite dans les conditions naturelles — un problème d'échantillonnage. Les hétérogénéités du sol déterminent en effet des zones où l'écoulement de l'eau est plus ou moins facilité ou freiné. L'exemple le plus évident est l'effet de la microtopographie de la surface du sol sur l'infiltration. A ces hétérogénéités du milieu physique s'ajoutent celles du milieu biologique. La prospection du sol par les racines répond à un déterminisme extrêmement complexe où interviennent des facteurs tels que la résistance mécanique du sol, l'aération, la présence d'éléments fertilisants... eux-mêmes répartis de façon très hétérogène dans le sol. Or le rôle des racines est évidemment prépondérant dans le processus de déssèchement par évapotranspiration. Un autre facteur d'hétérogénéité est introduit par les parties aériennes des plantes, qui dans certains cas (maïs, sorgho...) peuvent collecter les eaux de pluie ou d'irrigation et les rassembler préférentiellement sur la ligne au détriment de l'interligne.

Dans le cas de cultures herbacées à écartement relativement réduit, on peut admettre que l'essentiel des mouvements d'eau s'effectue dans le sens vertical et qu'une description unidimensionnelle des phénomènes donnera une image satisfaisante de la réalité. La notion d'échantillonnage correspond alors à la recherche d'une valeur moyenne à partir d'un tirage aléatoire dans une population homogène.

Il n'en sera pas de même dans les situations où la composante horizontale des mouvements d'eau peut être importante. C'est le cas des cultures à fort écartement

ou encore, à une autre échelle, des sols qui peuvent se fissurer plus ou moins profondément en période sèche. La fonction de l'échantillonnage est alors plus complexe car elle recouvre au moins partiellement celle d'une cartographie.

3.1. — *Variabilité des mesures neutroniques d'humidité du sol.*

La prospection systématique d'une parcelle par la méthode neutronique fait apparaître des variations de comptage très importantes qui sont dues en partie à la variation d'humidité, en partie à celle des paramètres neutroniques du sol.

a) *Variabilité dans la direction verticale.*

L'existence d'horizons pédologiques distincts superposés et le fait que les mouvements d'eau dans le sol s'effectuent principalement dans le sens vertical, suffisent à expliquer les hétérogénéités très importantes des comptages neutroniques dans cette direction. L'aspect extrêmement tourmenté de certains profils (fig. 1) incite à recommander un échantillonnage vertical assez dense (par pas voisins de 10 cm) et un repérage aussi précis que possible de la profondeur de la sonde.

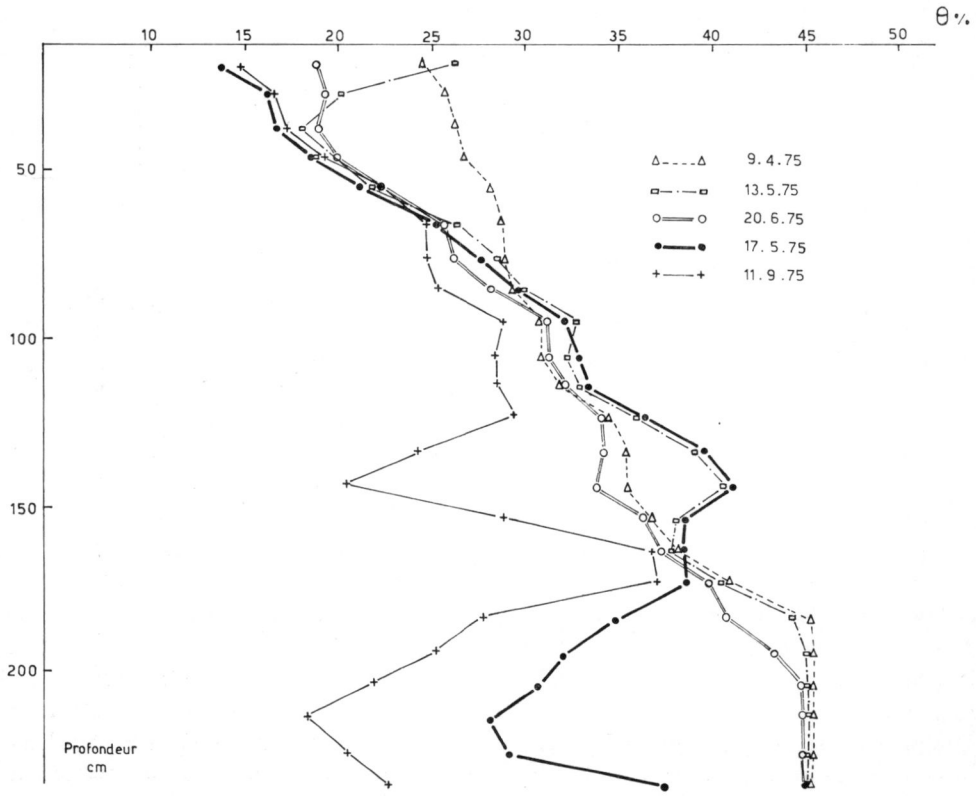


FIG. 1. — *Exemple d'évolution de profil d'humidité dans un sol hétérogène* (d'après Mme Isbérie). Cette figure montre clairement la nécessité de faire des mesures de teneur en eau rapprochées sur un profil. On notera que dans la couche 155-165 cm, les variations d'humidité sont très faibles, bien qu'il y ait sûrement un transfert assez important à cette cote.

b) *Variabilité dans le plan horizontal.*

Celle-ci peut être mise en évidence soit en comparant divers profils verticaux déterminés dans une parcelle homogène soit en effectuant des mesures à partir d'une fosse, le long de tubes installés horizontalement (Moutonnet, Peyremorte...). Cette dernière disposition est plus particulièrement adaptée à l'étude des hétérogénéités horizontales à petite échelle. On l'adoptera également lorsque les transferts d'eau ne sont pas purement verticaux (effets de ligne-interligne ou de bordure, irrigation localisée, culture à fort écartement...). Des exemples de profils en long ainsi obtenus sont présentés figure 2.

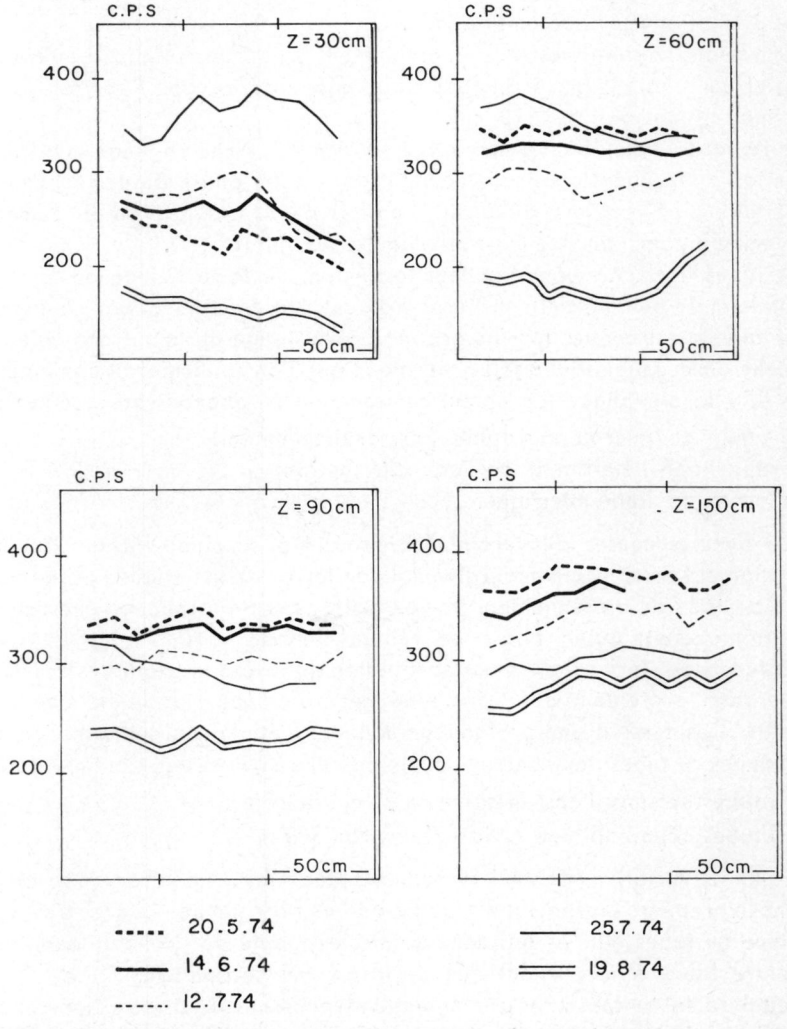


FIG. 2. — *Exemple de variabilité horizontale d'humidité en fonction de la profondeur* (d'après Moutonnet). L'échelle verticale est en impulsions par seconde. Il est néanmoins clair que les variations d'humidité sont bien plus importantes à faible cote qu'en profondeur.

3.2. — *Variabilité horizontale et verticale des écarts d'humidité interdate.*

C'est davantage la variabilité des *écarts d'humidité* entre deux dates que l'on doit considérer lorsque l'on cherche à déterminer les variations de stock d'eau du sol.

L'amplitude des variations d'humidité au cours d'une période donnée décroît le plus souvent en profondeur à cause de la lenteur des transferts d'eau entre la surface du sol et les couches profondes, et de la diminution de la densité des racines. On trouve cependant des cas où des horizons profonds plus ou moins sableux sont situés dans la zone de battement d'une nappe et peuvent subir des variations saisonnières d'humidité considérables. Un bon exemple a été présenté par Mme Isberie (fig. 1). Sur ces profils, les couches 0-65 d'une part, 125-155 cm et 185-245 cm d'autre part, subissent des variations d'humidité très amples au cours du déssèchement du sol entre le 3 avril et le 11 septembre 1975.

Ces variations sont dues vraisemblablement à l'action cumulée de l'évapotranspiration et du rabattement (drainage) d'une nappe qui occupe l'horizon sablo-limoneux situé en dessous de 170 cm.

On remarquera qu'un horizon intermédiaire plus riche en limon et argile reste à une humidité quasiment constante pendant toute cette phase de déssèchement, mais il serait faux d'en conclure qu'aucun transfert d'eau ne s'y produit, autrement dit qu'il coincide en permanence avec un plan de flux nul (cf. § 2).

Les tubes horizontaux permettent facilement de faire l'étude de la variabilité horizontale et de petite échelle des écarts d'humidité. Moutonnet par exemple (fig. 2) constate qu'elle est beaucoup plus grande au voisinage de la surface qu'en profondeur. Cette observation tout à fait générale et que l'on confirmerait également à plus grande échelle, s'explique facilement compte-tenu de phénomènes comme :

les effets de microtopographie (microruissellement),
la répartition hétérogène de l'eau d'irrigation,
les effets de ligne-interligne...

Ces diverses causes d'hétérogénéité portent principalement sur les processus d'infiltration et l'on constate généralement que la variabilité étudiée est moins importante en période de déssèchement par évapotranspiration (phénomène relativement lent et homogène), qu'en phase de réhumectation.

Les écarts de stock obtenus par sommation dans tout le profil des écarts d'humidité interdate, présentent une variabilité généralement plus faible que les écarts d'humidité considérés à une profondeur donnée. L'étude réalisée par Chambon sur deux groupes de tubes neutroniques d'une parcelle explorés aux mêmes dates :

- 5 tubes groupés dans un carré de 72 cm de côté,
- 5 tubes délimitant une surface d'environ 300 m^2,

montre que les variations de stock ne sont pas plus hétérogènes dans le second groupe que dans le premier. Autrement dit, au sein d'une parcelle homogène, c'est seulement le nombre de tubes étudiés qui conditionne la qualité de l'échantillonnage, la distance entre tubes n'intervenant que de façon très secondaire.

L'analyse en composantes principales des variations de stock observées au cours du temps sur plusieurs tubes d'une parcelle peut aider à faire ressortir le comportement particulier de certains emplacements et à le relier à des causes connues ou inconnues d'hétérogénéité. Elle devrait en tout cas constituer un bon critère d'homogénéité

de la parcelle. Le travail ainsi réalisé par Rambal laisse entrevoir des perspectives très intéressantes. Dans l'étude présentée qui portait sur une parcelle de 800 m² échantillonnée à l'aide de sept tubes verticaux, la composante principale de la variance entre tubes semble très fortement liée à la distance au bord de la parcelle. Il s'agirait donc d'un effet de bordure. Une composante plus faible serait expliquée par l'abondance plus ou moins grande de cailloux à la surface du sol. Il nous paraît toutefois hasardeux, compte tenu du petit nombre d'observations encore faites et des multiples problèmes d'interprétation que soulève, d'une manière générale, l'analyse en composantes principales, d'en tirer des conclusions trop optimistes.

3.3. — *Exemples de dispositifs de mesure adoptés.*

On peut déduire de ce qui précède que l'observation des variations de stock d'eau du sol à l'intérieur d'une parcelle suppose qu'un nombre suffisant de points de mesure ait été retenu. Le choix de ces points qui devrait être guidé par une étude préalable des hétérogénéités rencontrées dans la parcelle, conditionne en grande partie la qualité de l'information recueillie et son coût (quantité de données à traiter, temps de mesure, temps de calcul...).

L'adoption d'une technique d'échantillonnage résultera donc toujours d'un compromis entre le gain de précision que l'on espère obtenir en multipliant les points de mesure et l'accroissement de coût correspondant. A cet égard, les expérimentateurs qui utilisent l'humidimètre à neutrons de façon intensive (ITCF, IRAT...) sont les plus attentifs et ils se sont attachés à rechercher des protocoles expérimentaux peut-être moins performants sur le plan de la précision des mesures, mais qui permettent, à moindres frais, de contrôler un grand nombre de traitements.

La densité du réseau de points de mesure à mettre en place dans les différentes directions dépend de l'objectif poursuivi et des hétérogénéités rencontrées. Selon le problème étudié, la précision recherchée ou encore certains critères d'ordre pratique ou économique, les expérimentateurs choisissent des dispositifs à tubes verticaux ou horizontaux.

a) *Dispositifs à tubes d'accès verticaux.*

Ce sont de loin les plus employés car beaucoup plus faciles à installer ou à ôter. Le pas de mesure adopté est le plus souvent de 10 cm. Le nombre de tubes par traitement est de l'ordre de 4 à 6 en conditions de sol relativement homogène et en l'absence d'irrigation. Il en faut beaucoup plus s'il y a irrigation. Chambon et Peyremorte estiment qu'une vingtaine de tubes est nécessaire pour contrôler le bilan hydrique de parcelles irriguées avec une précision de 10 p. 100.

b) *Dispositifs à tubes d'accès horizontaux.*

A la suite d'une étude statistique portant sur plus de 10 000 mesures neutroniques, les auteurs précédents ont retenu pour ces mêmes parcelles irriguées, une solution à tubes horizontaux parallèles de 30 m de longueur, implantés à trois niveaux (20, 60 et 100 cm) et accessibles à un humidimètre à partir d'une seule fosse. Ils estiment que le fait d'ignorer les autres niveaux n'entraîne pas une perte de précision importante sur le calcul des variations de stock, ce qui peut être vrai pour des profils pédologiques très homogènes. On peut penser que l'information gagnée sur la répartition horizontale des variations d'humidité compense en grande partie ce qui est perdu dans la direction verticale.

Cette solution assez séduisante dans le cas de grande variabilité horizontale — elle a été également adoptée dans des vergers irrigués — présente le gros inconvénient de nécessiter le creusement d'une tranchée pour la pose des tubes, donc de produire un remaniement important du sol à l'endroit des mesures et de donner peu d'information sur une verticale. Les auteurs cités indiquent qu'un an après la mise en place, les effets sur les cultures ont apparemment disparu. Il n'en va certainement pas de même pour les propriétés physiques du sol et l'on peut craindre des perturbations dans la dynamique de l'eau. La question se pose alors du degré de représentativité des mesures opérées sur de tels dispositifs : les teneurs en eau mesurées dans les tranchées sont-elles les mêmes que dans le sol en place...

En conclusion de ce paragraphe, il est donc impossible de se prononcer actuellement sur le nombre de tubages nécessaire pour s'assurer que le bilan est bien représentatif de la parcelle ; aussi ne peut-on que souligner l'effort qui reste à faire sur ce point précis de méthodologie qui a d'ailleurs retenu l'attention de plusieurs chercheurs étrangers (Nielsen et Warrick).

IV. — Interprétation des mesures neutroniques et application à la détermination des composantes du bilan hydrique. Flux en surface et en profondeur

Nous n'insisterons pas ici sur les travaux dans lesquels on ne cherche strictement que l'humidité du sol et ses variations.

Citons seulement les communications de Cabelguenne et Maertens ou de Puech et Hernandez, fort intéressantes sur le plan agronomique, qui tendent à introduire le facteur humidité du sol dans la description (en termes probabilistes) d'un complexe pédo-agroclimatique donné, au même titre que tout autre facteur physique du milieu.

Nous nous attacherons essentiellement au problème de la détermination des diverses composantes du bilan hydrique tel qu'il a déjà été évoqué dans l'introduction. On ne saurait trop insister dans ce domaine sur la prudence nécessaire pour interpréter les variations de stock d'eau du sol. Trop souvent encore, celles-ci sont sans discussion approfondie, identifiées à la somme (P-ETR) et l'on a vu (équation 1) que cela revient non seulement à négliger le ruissellement mais aussi à considérer comme nul le terme $\overline{\varphi}_z.\Delta t$ de flux à la base des profils.

Les mesures de Daudet *et al.* sur limon profond à La Minière (Yvelines) ont permis de chiffrer l'importance de ce terme — remontées capillaires en l'occurrence — pour une culture de blé d'hiver pendant l'été 1976 : sur 300 mm d'eau consommés entre le 1er avril et le 17 juillet 1976, environ 110 mm provenaient de couches de sol situées en dessous de 170 cm. Le caractère exceptionnel de la sécheresse de 1976 a amplifié considérablement ce phénomène qui est normalement d'une importance mineure dans la région versaillaise. On peut néanmoins penser que des sols de même type, mais situés dans des régions à sècheresse estivale mais à pluviométrie hivernale suffisamment importante pour permettre une reconstitution des réserves, présenteraient de façon régulière ce comportement.

Le fait que l'humidité du sol à la base des profils reste quasiment constante ne permet en aucun cas de conclure à l'inexistence de flux d'eau à ces niveaux, puisqu'en régime quasi permanent on sait que l'on peut avoir transfert d'eau sans varia-

tion d'humidité à condition qu'il existe un gradient de potentiel. L'exemple déjà cité de profils hydriques « étranglés » à la profondeur de 170 cm (fig. 1) illustre bien la possibilité de transferts d'eau sans doute importants à travers de tels horizons à teneur d'eau stationnaire, d'où erreur sur le bilan hydrique si l'on ne tient pas compte de ce terme.

Mis à part certains cas « favorables » où ces flux profonds peuvent véritablement être négligeables :

— sous-sol rocheux compact non fissuré,

— présence d'un lit de gravier ou de sables grossiers formant écran capillaire dès que les tensions décroissent quelque peu,

— sous-sol constamment sec (saison pluvieuse insuffisante pour reconstituer les réserves profondes),

il est nécessaire d'estimer l'importance de ces termes.

Les méthodes actuellement disponibles pour le faire sont encore peu nombreuses et assez difficiles à mettre en œuvre. Deux principes fort différents sont à distinguer selon qu'ils fournissent une information sur les flux d'eau à la surface du sol ou en profondeur.

1. — *Mesure directe du flux d'eau en surface*

Comme le montre l'équation (1) la détermination directe de ce flux (c'est-à-dire de l'ETR) permettra de déduire l'autre composante du bilan $\varphi_z . \Delta t$ dans la mesure toutefois où l'on peut négliger le ruissellement r.

Deux méthodes permettent de déterminer ce flux :

— le bilan d'énergie,

— la technique lysimétrique.

L'une et l'autre ont été largement décrites et critiquées par ailleurs ; encore convient-il de souligner ici que si l'on tente de mesurer le flux de surface, c'est pour le comparer à la variation du stock d'eau ΔS que la mesure neutronique fournit sur des laps de temps de plusieurs jours, d'où l'importance particulière du temps caractéristique de la mesure. A cet égard, on notera que le bilan d'énergie (qui délivre des valeurs de flux sur des laps de temps de quelques dizaines de minutes et ne permet d'accéder au flux moyen sur plusieurs jours que par sommation de valeurs obtenues consécutivement) semble moins adapté au problème que la technique lysimétrique, abstraction faite évidemment de toute autre considération.

2. — *Contrôle des flux d'eau passant à travers une cote donnée*

A l'opposé de ce qui a été proposé en II.1, la méthode consistera maintenant à déterminer directement le flux en profondeur de façon à déduire des mesures de variations de stocks ΔS (données par l'humidimètre à neutrons) l'autre terme du bilan : ETR à partir de l'équation (1).

Il s'agit dans ce cas de mettre à profit les connaissances acquises en physique des transferts dans la zone non saturée pour déterminer directement les flux à un niveau quelconque. Deux techniques différentes, mettant en œuvre simultanément des mesures tensiométriques et neutroniques, peuvent être appliquées, à condition de considérer

une cote de contrôle située en dehors de la zone de sol occupée par les racines ; ce sont respectivement :

— la méthode du plan de flux nul,
— l'application de la loi de Darcy.

Le principe de ces méthodes, résumé fig. 3, est développé dans la communication de Vauclin et Vachaud.

a) *Méthode du plan de flux nul.*

A partir d'une batterie de tensiomètres, on peut déterminer à tout instant le profil de potentiel total, ou charge hydraulique H(z) d'après la formule $H = h - z$.

Où h est la pression effective de l'eau (exprimée en hauteur d'eau) mesurée à la cote z (grandeur également définie comme le potentiel matriciel). Dans cette formule, l'axe Oz est orienté positivement vers le bas. Si l'on considère la loi de Darcy généralisée pour définir les transferts d'eau dans la zone non saturée, lors d'un écoulement vertical le flux φ_z passant à travers un niveau z est lié au gradient de charge à ce niveau par la relation

$$\varphi_z = - K(\theta) \frac{dH}{dz} \tag{6}$$

où $K(\theta)$ est la conductivité hydraulique du sol.

On peut déduire de cette expression que s'il existe dans le sol à un instant t, une cote z_0 où la courbe H(z) présente un maximum (donc une pente $dH/dz = 0$), le flux sera nul à ce niveau qui séparera une zone en écoulement ascendant ($z < z_0$) d'une zone en écoulement descendant ($z > z_0$). Ce niveau, lorsqu'il existe, est appelé *plan de flux nul* et il peut être aisément repéré sur les profils tensiométriques. On notera qu'il évolue dans le temps.

Si par ailleurs, on détermine par sondage neutronique l'évolution des teneurs en eau sur le même site au cours du temps, on peut, connaissant $z_0(t)$ calculer le flux cumulé passant à travers un niveau z quelconque par la formule :

$$\overline{\varphi}_z . \Delta t = [\Delta S]_z^{\overline{z_0}} \tag{7}$$

Dans cette formule, $\overline{z_0}$ représente la *position moyenne* dans le profil du plan de flux nul pendant l'intervalle considéré Δt, et ΔS est la variation de stock entre les niveaux $\overline{z_0}$ et z pendant cet intervalle de temps. On notera que par convention, si $z > \overline{z_0}$, le flux cumulé est positif (le réservoir sol se remplit) alors que si $z < \overline{z_0}$ ce terme est négatif (le réservoir sol perd de l'eau).

Cette méthode s'applique (strictement) sans restriction sur sol nu. Si dans l'équation (4) le niveau de contrôle est $z = 0$, on voit que l'on obtient une mesure directe de l'évaporation cumulée E (en hauteur d'eau) pendant un intervalle Δt par la relation :

$$E = [\Delta S]_0^{\overline{z_0}} \tag{8}$$

Sur sol cultivé, et *à condition que* $\overline{z_0}$ soit situé en dessous du profil racinaire, on peut montrer que la variation de stock $[\Delta S]_0^{\overline{z}}$ mesurée par une sonde à neutrons correspond à la somme de deux termes : l'écoulement de l'eau dans le sol et l'extraction racinaire. On obtiendra alors directement une mesure de l'évapotranspiration réelle :

$$ETR = [\Delta S]_0^{\overline{z_0}} \tag{9}$$

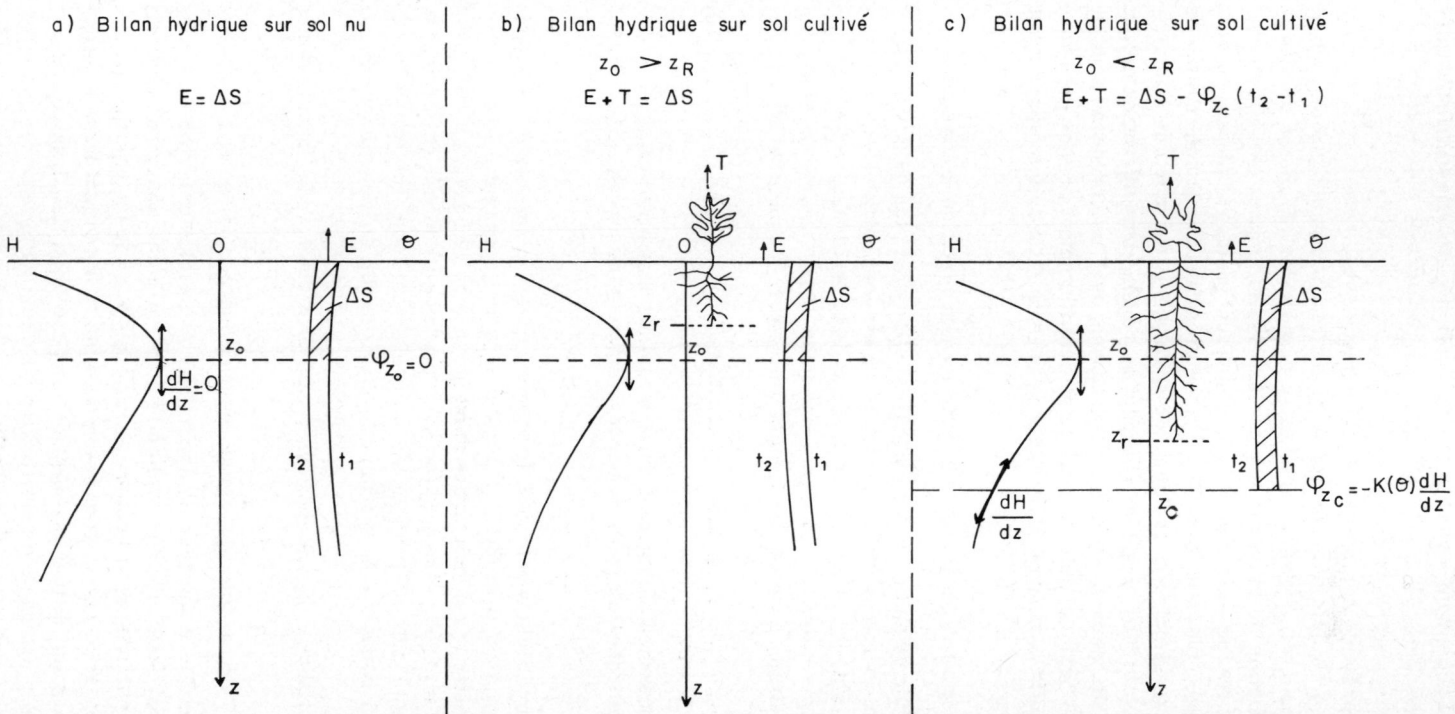


FIG. 3. — *Schéma de calcul des bilans hydriques par les méthodes du plan de flux nul ou d'application de la loi de Darcy généralisée pour des dates t_2 et t_1 rapprochées* (d'après Vauclin et Vachaud).

a) *Sol nu* : l'évaporation E est égale à la variation de stock ΔS au-dessus du plan de flux nul (aire hachurée).
b) *Sol cultivé avec plan de flux en dessous des racines* : l'évapotranspiration E + T est égale à la variation de stock ΔS au-dessus du plan de flux nul.
c) *Sol cultivé avec plan de flux nul dans la zone racinaire* : la loi de Darcy généralisée permet de calculer le flux φ_{z_c} à la cote de contrôle z_c. L'évapotranspiration E + T est égale à la variation de stock diminuée du flux cumulé à la cote z_c.

Cette méthode est cependant *strictement inapplicable* si $\overline{z_0}$ se trouve dans la zone racinaire, car on sous-estimerait alors l'ETR de tous les termes d'extraction racinaire, dans les niveaux $z > \overline{z_0}$.

Par ailleurs, elle présente naturellement les inconvénients inhérents aux mesures tensiométriques (risque de désamorçage des tensiomètres, sensibilité aux variations de température journalières...) et neutroniques (précision des variations de stock). Au contraire de la méthode du bilan d'énergie, elle s'applique assez mal si l'on veut faire des bilans sur courtes périodes : à l'échelle de la journée, les variations de stocks sont trop faibles pour être obtenues avec une grande précision. Si par contre, on a de longues périodes (de la semaine à quelques mois) caractérisées par une demande évaporative continue (absence de pluie) elle peut se révéler très intéressante : les variations de stock d'eau peuvent en effet être mesurées avec une précision relative assez bonne ; quant au profil de potentiel, même si les tensiomètres près de la surface du sol décrochent, il suffit de pouvoir déterminer la position du maximum pour avoir l'information souhaitée.

b) *Application de la loi de Darcy généralisée à la détermination directe du flux en profondeur.*

S'il n'est pas possible de mettre en évidence l'évolution d'un plan de flux nul, ou si ce plan se trouve dans la zone racinaire, on peut déterminer directement le flux φ_z à tout niveau situé hors de la zone racinaire à partir de la seule mesure de la teneur en eau à ce niveau et de la différence de potentiel entre deux tensiomètres entourant ce niveau. L'application de la loi de Darcy généralisée (éq. 6) donne en effet :

$$\varphi_z = - K(\theta) \frac{H_2 - H_1}{\Delta z} \qquad (10)$$

où H_1 correspond au potentiel total mesuré par le tensiomètre au niveau z_1,
où H_2 correspond au potentiel total mesuré par le tensiomètre au niveau z_2.

$$\Delta z = z_2 - z_1 \qquad (z_2 > z_1)$$

K est la conductivité hydraulique du sol à la teneur en eau θ mesurée au niveau z.

Pour que cette formule soit valide, il importe que Δz soit petit (entre 20 et 30 cm). On notera que cette méthode est instantanée et donne le sens du flux φ_z qui est positif (orienté vers le bas) si $H_2 < H_1$, et négatif (orienté vers le haut) dans le cas contraire.

La grande difficulté d'application réside naturellement dans la connaissance de la loi $K(\theta)$ entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau au niveau de référence.

Cette loi, caractéristique du sol considéré, peut être déterminée de différentes façons :

i) *soit par la méthode de drainage interne*, développée par Hillel *et al.* (1972) :

Cette méthode consiste à effectuer un apport d'eau suffisamment important pour que la redistribution soit facile à suivre jusqu'à l'horizon profond considéré. Une fois la lame d'eau totalement infiltrée, on couvre la surface du sol de façon à éviter toute évaporation. On *impose ainsi* que la cote du plan de flux nul pendant toute la redistribution soit $z_0 = 0$. On suit durant la redistribution l'évolution des stocks d'eau par sondage neutrons, et des profils de potentiels à partir d'une batterie de tensiomètres, ce qui permet d'obtenir à tout moment, à l'horizon profond de cote z considéré :

— le gradient de potentiel à partir des mesures de potentiel sur deux tensiomètres entourant cet horizon : $\frac{H_2 - H_1}{\Delta z}$;

— le flux à partir de la variation de stock entre deux instants t et $t + \Delta t$

$$\varphi_z \cdot \Delta t = [\Delta S]_z^0$$

La corrélation entre flux et gradient donne la conductivité hydraulique K relative à la teneur en eau mesurée au temps moyen (fig. 4). Pour être applicable, cette méthode exige que l'écoulement dans la zone de mesure soit unidirectionnel vertical et que le sol soit homogène.

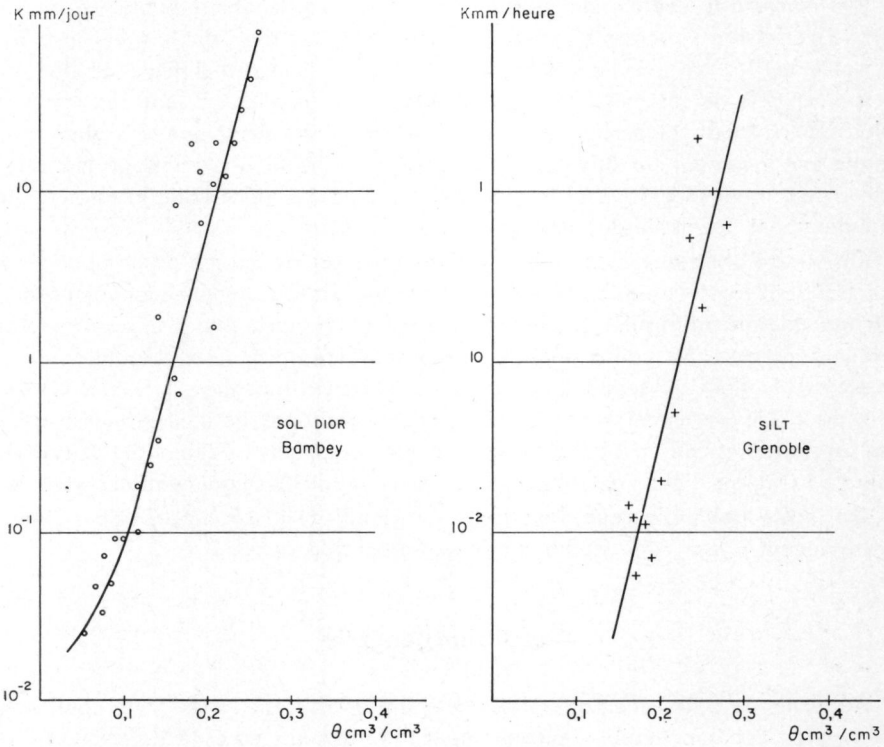


FIG. 4. — *Exemple de courbe K(θ) obtenue* in situ
— sur le site de Grenoble (silt) à la cote z = 100 cm.
— sur le site de Bambey (sol Dior) jusqu'à la cote z = 150 cm.

ii) *soit par la méthode du plan du flux nul* :

Cette méthode permet en effet d'obtenir le flux (éq. 7) et le gradient de potentiel à tout niveau. Pour minimiser les erreurs, on mesurera (ou estimera) le gradient de potentiel au niveau de l'horizon de contrôle $\frac{(H_2 - H_1)}{\Delta z}$ et la teneur en eau θ à cet horizon au temps correspondant au milieu de l'intervalle Δt d'estimation du flux. Cette deuxième méthode n'exige pas d'installation ni d'essai complémentaire ; elle donnera plutôt la branche K(θ) correspondant aux faibles teneurs en eau.

iii) *soit enfin en couplant bilan d'énergie et bilan dans le sol* :

Cette dernière méthode, bien que plus laborieuse et exigeant un matériel assez sophistiqué peut être plus sûre. Elle consiste à déterminer directement l'ETR à la surface du sol par bilan d'énergie, et à en déduire le flux cumulé $\overline{\varphi}_z . \Delta t$ à la profondeur z considérée en utilisant la relation (1), ce qui revient à associer à la méthode du bilan d'énergie la méthode neutronique pour déterminer $[\Delta S]_0^z$ et deux tensiomètres, aux cotes z_1 et z_2 entourant la profondeur de contrôle z. On mesure ainsi indépendamment le flux $\overline{\varphi}_z$, la teneur en eau θ et le gradient de potentiel $\frac{H_2 - H_1}{\Delta z}$, d'où la valeur de K par application de l'équation (10).

On trouvera à titre d'exemple fig. 4, les courbes $K(\theta)$ obtenues sur un sol limoneux à Grenoble à l'horizon $z = 100$ cm par la méthode ii) et sur le sol Dior à Bambey, entre 0 et 150 cm par les méthodes i et ii). Il est encore difficile de définir la précision exacte de ces mesures ; on sait également qu'elles ne sont que très ponctuelles. La connaissance de ces courbes peut néanmoins fournir une indication fondamentale sur la valeur du flux en profondeur en utilisant une méthode très simple — deux tensiomètres entourant la cote de mesure —, et permet de revaloriser fondamentalement la méthode neutronique.

On notera enfin que d'après la formule (10) il est clair que l'on ne peut absolument pas faire systématiquement l'hypothèse encore très généralement admise en neutroagronomie, qu'il suffit que la teneur en eau θ ne varie plus à une certaine profondeur pour que l'on puisse négliger la composante $\overline{\varphi_z} . \Delta t$ dans l'équation (1). Ce terme n'est en effet négligeable que si θ est très faible ($K(\theta)$ négligeable) *ou* si dH/dz est voisin de 0. L'expérience montre que ces deux conditions ne sont jamais pratiquement satisfaites, et que même dans des conditions de profils très secs, dH/dz est plutôt voisin de 1 (régime d'écoulement permanent et gravitaire), ce qui conduit à $\overline{\varphi_z} \neq K(\theta)$.

On ferait moins d'erreur dans le calcul global de l'ETR d'après l'équation (1) en remplaçant $\overline{\varphi_z}$ par cette valeur plutôt qu'en considérant $\overline{\varphi_z} = 0$.

Conclusion générale

Au terme de cette réflexion de synthèse, il apparaît que la méthode neutronique peut donner des informations extrêmement intéressantes pour la détermination du bilan hydrique, à condition de n'être considérée que comme un outil *indispensable mais non suffisant.*

Le gros avantage de cet outil est de permettre une mesure instantanée et non destructive du stock d'eau dans le sol. Cette mesure est cependant locale, et les variations de stock ne peuvent être traduites en terme de bilan hydrique que si l'on connaît la direction des transferts et les caractéristiques hydrodynamiques du sol.

Ces points limitatifs sont actuellement les écueils les plus importants à la généralisation de cette méthode. Il nous semble, au vu des résultats obtenus, que les voies de recherches qui doivent être développées pour surmonter ces difficultés sont actuellement les suivantes :

— Méthode de caractérisation et de prise en considération des variations spatiales du sol en tant que milieu poreux (représentativité des mesures).

— Méthode de détermination sûre et précise des caractéristiques hydrodynamiques du sol *in situ* (essentiellement conductivité hydraulique K(θ).

— Développement de la fiabilité des mesures tensiométriques.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Neutronic measure of the water stock in Soil. Application to determination of water balance

On the basis of the variations of water stock ΔS on the depth of soil 0-z measured by neutronic apparatus, it is possible to determine one of the two terms of the water balance, evapotranspiration ETR or flux φ_z, if the other term is directly measured.

Different methods are reviewed and the sampling problem is discussed.

Zusammenfassung

Die Neutronenmessung der Wasserreserve im Boden und deren Schwankungen Anwendung bei der Bestimmung der Wasserbilanz

Wenn man von den Schwankungen der Wasserreserve ΔS in der Bodentiefe 0-z (gemessen mit dem Neutronenapparat) ausgeht, ist es möglich, eine der beiden Komponenten der Bilanz zu bestimmen, nämlich die Evapotranspiration und den Fluss, wenn die andere Komponente direkt gemessen wird. Verschiedene Methoden werden durchgesprochen, und das Problem der Stichprobenerhebung wird erörtert.

РЕЗЮМЕ

Нейтронное измерение водных резервов почвы и их изменений.
Применение этого метода при определении водного баланса.

Доде Ф.А., Вашо Г.

Первый термин баланса — эвапотранспирация ЕТЯ и поток φz определяется на базе изменений водного резерва ΔS почвы, на глубине 0 — z, измеряющихся нейтронным влагомером, в то время как второй термин можно найти при помощи прямого измерения.

Рассматриваются разные методы определений и обсуждается проблема отбора образцов.

Références bibliographiques

(à l'exclusion des communications présentées au Séminaire)

HILLEL D., KRENTOS V. D., STYLIANOU Y., 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. *Soil Sci.*, **114,** 385-400.

NIELSEN D. R., BIGGAR J. W., ERH K. T., 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, **42,** 215-259.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J. M., BLANCO de PABLOS A., 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture — exemple d'application. *Ann. agron.*, **26** (1), 19-40.

ROYER J. M., VACHAUD G., 1974. Détermination directe de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succions. *Bull. Sci. Hydrol.*, AISH, **17** (3), 319-336.

N. B. — Les communications de ce Séminaire paraîtront intégralement dans les premiers numéros du Bulletin édité par le « Groupe français d'Humidité neutronique (Cf. Table des Matières du Séminaire).

Ann. agron., 1977, **28** (5), 521-541.

Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien

G. GOSSE, A. PERRIER et B. ITIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

La détermination, par la méthode du bilan d'énergie, de nombreuses valeurs d'ETR d'une culture de blé, a permis l'application de méthodes statistiques pour estimer certaines variables difficiles à mesurer en pratique, notamment le déficit de saturation au niveau de la surface du couvert Y_h. Cette approche a conduit à proposer différents modèles d'estimation d'ETR pour la culture étudiée. Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau 1. Une étude plus fine de la formulation la plus simple :

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0)$$

avec $\frac{P'}{P' + \gamma}$ constante

R_n Rayonnement net

φ_0 Flux de chaleur échangée par conduction avec le sol,

nous a amenés à proposer différents coefficients k selon l'âge et le stade phénologique de la culture étudiée (tabl. 3).

Introduction

Pour l'agronome, la connaissance des besoins en eau des cultures est un des paramètres nécessaires à l'établissement d'un plan d'aménagement d'une région ou à la conduite d'une irrigation. Cette connaissance implique la détermination et la compréhension des variations des consommations réelles en eau des cultures dans diverses conditions. L'impossibilité jusqu'à nos jours de mesurer, d'une façon simple et à une échelle de temps fine, ces pertes ou évapotranspirations (ETR) dans les conditions naturelles a amené les praticiens à utiliser une formulation qui tienne compte des facteurs du climat, et néglige autant que faire se peut les paramètres contingents à la culture. Cette formulation climatique, notamment à travers les études théoriques de Penman (1948) et de Bouchet (1964) conduit à la définition d'évaporations potentielles EP qui représentent la demande climatique, borne supérieure des évapotranspirations observables dont la valeur peut être éloignée de la valeur réelle des pertes en eau.

En fait, face à ces divergences toujours présentes entre les ETR et les EP calculées, il y a souvent intérêt à cerner au plus près cette consommation en eau ; c'est pourquoi dans le cadre de cette étude, nous avons, à la suite de nombreuses mesures d'ETR, essayé de dégager une méthode d'estimation de l'ETR de la culture étudiée. Pour cela nous avons utilisé plusieurs expressions analytiques d'ETR, expressions dans lesquelles certaines variables difficilement mesurables en pratique ont été estimées grâce à une approche statistique. Selon le nombre et la nature des variables utilisées, ce système d'analyse a permis d'une part de mettre au point des méthodes d'estimation de l'ETR, et d'autre part de hiérarchiser le rôle des différentes variables entrant en jeu notamment celles de nature biologique.

I. — Rappels théoriques

Penman (1948) a proposé une formulation de l'évapotranspiration pour un couvert végétal schématisé et réduit à une surface idéale à saturation au niveau de laquelle toute l'énergie disponible serait absorbée. En transposant cette formulation à l'échelle instantanée, on peut écrire :

$$EP^* = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \left(1 + \frac{\rho . c_p . H . Y_R}{R_n + \varphi_0}\right) \qquad (1)$$

avec, en exprimant les unités dans le système international :

- EP^* : évapotranspiration potentielle ($W . m^{-2}$)
- R_n : rayonnement net ($W . m^{-2}$)
- φ_0 : flux de chaleur à la surface du sol ($W . m^{-2}$)
- ρ : masse spécifique de l'air ($kg . m^{-3}$)
- c_p : chaleur massique ($J . {}^oC^{-1} . kg^{-1}$)
- H : coefficient d'échange convectif entre la surface et le niveau de référence R($m . s^{-1}$)
- Y_R : la différence entre la température de l'air et la température du point de rosée mesurée au niveau de référence R pris suffisamment haut pour que l'influence du couvert puisse être négligée
- P' : valeur de la dérivée de la pression de vapeur saturante pour la température du thermomètre humide T_h
- γ : constante psychrométrique (65 $P . {}^oC^{-1}$).

On peut généraliser cette formulation au cas concret d'un couvert végétal présentant, de par sa structure, d'une part une répartition verticale de l'énergie disponible ou rayonnement net et, d'autre part une régulation des échanges gazeux au niveau de toutes les surfaces évaporantes (pas de saturation au niveau de la surface des feuilles sauf cas exceptionnel après pluie, rosée ou irrigation). On doit alors prendre en considération, non plus une surface quelconque représentative du couvert mais de façon précise la surface supérieure du couvert (plan de cote h). Dans ces conditions les températures de l'air et du point de rosée au niveau de la surface h ne sont plus égales mais présentent une différence Y_h et l'expression de l'ETR devient :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \left(1 + \frac{\rho . c_p . H(Y_R - Y_h)}{R_n + \varphi_0}\right) . \qquad (2)$$

H est alors le coefficient d'échange entre le sommet du couvert h et le niveau de référence R.

Il est possible d'exprimer la relation (2) d'une autre façon, en termes de résistances (Perrier *et al.*, 1975) :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \cdot \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_c}{r_a}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_v}{r_a}} \qquad (3)$$

avec : r_a = résistance aérodynamique du couvert
= inverse du coefficient d'échange H
r_v = résistance du couvert à la diffusion de la vapeur d'eau
r_c = résistance critique définie comme suit :

$$r_c = \frac{P' + \gamma}{\gamma} \cdot \rho c_p \cdot \frac{Y_R}{R_n + \varphi_0}.$$

On verra dans la suite de l'exposé l'intérêt de cette formulation. Outre ces deux formulations de l'ETR qui correspondent à une généralisation de la formule de Penman grâce à l'introduction de résistances à la diffusion caractérisant la réaction du couvert, il est possible, à partir de l'équation du bilan d'énergie, d'exprimer l'ETR de la façon suivante, qui ne tient compte que des grandeurs mesurées par la méthode du bilan d'énergie :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \left(1 - \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot X\right) \qquad (4)$$

avec : X = rapport des gradients de températures sèche et humide au-dessus de la culture envisagée.

C'est cette formulation de l'ETR qui a été retenue dans le dispositif de mesures automatiques ou système BEARN (Perrier *et al.*, 1975) qui a fourni les valeurs utilisées dans la suite de cette étude. On pourra noter au passage la similitude entre les relations 2, 3 et 4 donnant ETR ; seul le choix des paramètres explicatifs a changé.

En effet, on peut écrire :

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0). \qquad (5)$$

Les termes de passage, les différentes variables Y_h (écart entre la température de l'air et la température du point de rosée au niveau h), r_v (résistance globale du couvert) et X (rapport des gradients de température sèche et humide au-dessus du couvert), sont parfaitement définis.

Compte tenu des problèmes expérimentaux posés par la détermination de ces différentes variables, X, Y_h et r_v, nous proposons une méthode d'estimation d'ETR d'une culture à partir de variables plus simples à mesurer, notamment R_n et Y_R.

La relation (4) qui a donc servi à calculer toutes les valeurs d'ETR, semblait privilégiée par rapport aux formules (2 et 3) pour une étude statistique globale selon une méthode de régression linéaire progressive (optimalisation de l'ordre d'introduction des variables) ; en effet, de ces trois formules et de leurs variables respectives représentatives de l'action du couvert (X, Y_h et r_v), seule X (relation 4) était directement

mesurée. Ainsi, l'indépendance entre X, variable à expliquer, et les variables explicatives caractérisant le climat (R_n, Y_R, T_a et r_a) ou la plante (indice de surface foliaire LAI ou encore par l'intermédiaire du système racinaire et de la régulation stomatique, l'évolution du stock en eau ΔH) était-elle assurée. Cette étude très globale sous la forme :

$$X = a_9 R_n + b_9 Y_R + c_9 LAI + d_9 \Delta H + e_9 r_a + f_9 T_a \qquad (6)$$

donne un modèle d'estimation précis d'ETR (cf. modèle IX). Ce modèle sera développé dans un autre article ; on ne considérera ici que les résultats. Cependant, afin de minimiser la recherche toujours un peu arbitraire de corrélations, nous avons, après cette première étude, essayé de limiter l'analyse statistique et pour cela nous avons retenu l'expression (2) et la variable Y_h. En effet, la relation (2) fait intervenir :

— des variables purement climatiques Y_R et P',

— des variables intermédiaires dépendant très largement du climat, mais aussi dans une moindre mesure, des paramètres physiques de la végétation, ce sont R_n, φ_0 et H,

— une variable Y_h caractérisant essentiellement la réponse du couvert (régulation stomatique) aux conditions extérieures, mais qui dépend aussi, dans une certaine mesure, des conditions climatiques (Perrier, 1976). Ainsi, si l'on considère les variables Y_R, R_n, φ_0 et H comme étant déterminées par le climat et les caractéristiques purement physiques du couvert végétal, la variable Y_h traduit seule la réaction biologique de ce couvert face aux conditions d'approvisionnement hydrique. C'est le terme qui traduit la réduction d'ETR par rapport à EP* (relations 1 et 2) ; on pourra donc écrire :

$$Y_h = f \quad \begin{array}{l}\text{(climat et déficit hydrique du sol par l'intermédiaire}\\ \text{de la régulation stomatique du couvert).}\end{array} \qquad (7)$$

Compte tenu de la relation (2) et des informations concernant la variable Y_h, nous allons établir et tester différents modèles d'estimation d'ETR ; ces modèles différeront par la manière dont on a cherché à expliquer la variable Y_h. Pour ces modèles, la complication croissante en fonction du nombre de variables utilisées n'ira d'ailleurs pas toujours de pair, ni avec une meilleure précision, ni avec le but recherché qui, suivant l'emploi que l'on compte faire d'une formule d'ETR, nécessite plus ou moins de précision mais toujours une certaine simplicité.

II. — Définition des modèles utilisés pour estimer Y_h

Le facteur climatique dominant, intervenant sur Y_h, est la valeur de Y_R. Il est en effet évident qu'il existe une certaine proportionnalité entre ces deux termes. On écrira donc :

$$\alpha = \frac{Y_R - Y_h}{Y_R}.$$

Cette hypothèse permet d'écrire la relation (2) sous la forme suivante :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{\rho c_p H.Y_R}{R_n + \varphi_0}\right). \qquad (8)$$

L'objet de cette étude est de tester le déterminisme du paramètre α représentatif du couvert et de sa réaction au climat par une analyse statistique portant sur un grand nombre de mesures effectuées sur un couvert de blé à la Minière. En effet, à partir de la relation (7), différentes hypothèses peuvent être émises correspondant à différentes approches.

1. — *Recherche de α sous forme d'une constante (modèle I et II)*

Il est possible de supposer qu'en première approximation, cette valeur de α, pour toute une saison de végétation, prend une valeur donnée :

— on ne retiendra pas la valeur unité pour α puisqu'elle correspond à la formulation de Penman (relation 1) qui s'éloigne le plus fortement des valeurs d'ETR. En effet, cette relation suppose la saturation au sommet du couvert ($Y_h = 0$), ce qui est irréalisable dans les conditions naturelles (Perrier, 1971-1975),

— par contre la valeur $\alpha = 0$ est non seulement une valeur moyenne très souvent rencontrée dans les conditions naturelles de plein champ (Perrier, 1977), mais encore la valeur qui conduit à la relation la plus simple :

Modèle I :

$$\alpha = 0 \qquad \text{soit } Y_h = Y_R$$

d'où :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \; ; \tag{9}$$

— bien entendu, les valeurs expérimentales concernant un couvert végétal donné permettent de préciser une valeur moyenne de α, positive ou négative, plus ou moins proche de 0 (valeur précédente) qui permet de mieux ajuster les valeurs d'ETR estimées avec le lot de données expérimentales :

Modèle II :

$$\alpha = \text{Cte} \neq 0$$

$$(\bar{\alpha}_{75} = 0{,}12 \qquad \bar{\alpha}_{76} = 0{,}14).$$

2. — *Recherche du coefficient α sous forme d'une fonction de variables climatiques (Modèles III, IV et V)*

Ce type de choix suppose que, pour un couvert donné, les paramètres biologiques, assez stables dans le temps, sont traduits par les constantes introduites dans les fonctions recherchées et que les grandeurs climatiques, très fluctuantes sont les variables qui, par l'intermédiaire des fonctions biologiques, modifient le coefficient α. Il faut souligner que cette hypothèse n'est pas apparemment en parfait accord avec les arguments développés précédemment (formule 7 donnant Y_h) puisque la régulation biologique déterminait seule dans une large mesure cette valeur de α. En fait si, pour un couvert donné, on a une relation assez bonne entre régulation et paramètres du climat, il est possible de rechercher α, uniquement sous la forme d'une relation dépendant des facteurs climatiques. On a donc recherché des relations linéaires simples entre α et certains facteurs climatiques, notamment :

— le rayonnement net, dont on sait le rôle sur la régulation stomatique au niveau d'une feuille (Djavanchir, 1973) et, par conséquent, très probablement sur le couvert végétal pris dans son ensemble :

Modèle III :

$$\alpha = a_3 R_n + b_3 ;$$

— la résistance critique

$$r_c \left(r_c = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{(P' + \gamma).Y_R}{(R_n + \varphi_0)} \right)$$

qui est en fait une combinaison entre le déficit de saturation de l'air et le rayonnement net. Compte tenu d'une part du modèle III et d'autre part du fait que la résistance stomatique est inversement proportionnelle au déficit de saturation (Berger, 1971 ; Shawcroft et Lemon, 1971), nous avons adopté l'expression suivante :

Modèle IV :

$$\alpha = a_4 \frac{1}{r_c} + b_4 ;$$

— bien que l'effet majeur de Y_R ait déjà été pris en compte en posant $Y_h = aY_R$ il est possible, comme les résultats le justifient, de rechercher malgré tout α en fonction de ce terme, soit :

Modèle V :

$$\alpha = a_5 Y_R + b_5$$

ce qui revient à rechercher une relation quadratique entre Y_R et Y_h.

3. — *Recherche de α sous forme d'une fonction de variables à la fois biologiques et climatiques (Modèles VI, VII et VIII)*

Sous cette forme, l'approche est différente de celle faite aux paragraphes précédents. En effet, on suppose qu'en dehors de Y_R, introduit dans la relation $Y_h = aY_R$, le climat n'intervient plus comme seul facteur direct ; on introduit une action conjuguée du climat agissant à travers le déficit hydrique ΔH * et la résistance critique r_c définie précédemment et des paramètres biologiques. Ces paramètres sont la surface foliaire totale du couvert LAI et la régulation de l'évapotranspiration réelle qui se traduit à travers l'évolution du déficit hydrique. Trois relations linéaires ont été choisies, compte tenu de ces paramètres, pour calculer :

— une action conjuguée du déficit hydrique et de la surface foliaire, soit

Modèle VI :

$$\alpha = a_7 \Delta H + b_7 LAI + c_7 ;$$

— une action conjuguée du déficit hydrique et de la résistance critique (facteur climatique complexe) soit :

---

* Le déficit hydrique est défini simplement ici comme étant la différence entre la somme des pluies et la somme des évapotranspirations réelles ($\Sigma P - \Sigma ETR$), valeurs qui sont cumulées à partir de la fin du ressuyage du sol, soit environ fin Février pour nos données expérimentales de la Minière. Bien entendu un terme correctif, fonction de la réserve facilement utilisable, pourrait être introduit. Mais, dans cette première analyse, il n'a pas été pris en compte pour réduire le nombre de grandeurs climatiques qu'il serait nécessaire de mesurer dans le cas d'une utilisation pratique, sans compter qu'un tel terme, de par sa forme linéaire, se retrouve en grande partie dans les constantes c_6, c_7 et c_8.

Modèle VII :

$$\alpha = a_0 \Delta H + b_0 r_c + c_0 ;$$

— enfin une action du déficit hydrique combiné à la résistance critique :

Modèle VIII :

$$\alpha = a_8 \Delta H + b_8 \frac{\Delta H}{r_c} + c_8 .$$

III. — Dispositif expérimental

Les différents modèles décrits ci-dessus ont donc été testés à partir de mesures horaires de l'évapotranspiration réelle faites sur une culture de Blé de plein champ (plusieurs hectares) sur le domaine expérimental de la Minière. Ces mesures sur une variété de blé d'hiver « Talent » furent réalisées à l'aide du dispositif « BEARN » mis au point au laboratoire (Perrier *et al.*, 1975) et complétées, à un niveau de référence (3 m au-dessus du couvert en 1976 et 2 m en 1975) par la mesure de la température de l'air, la température du point de rosée (psychromètre) et la vitesse du vent. Ces derniers paramètres climatiques sont indispensables d'une part pour la détermination du coefficient d'échange H(H = f(u)) et d'autre part pour le calcul de α par l'intermédiaire de la relation (8).

Ces mesures poursuivies en 1975 et 1976 se réfèrent donc à deux années climatiques qui présentent une assez bonne homogénéité au point de vue météorologique à l'exception de la pluviométrie, différente à l'extrême :

— L'année 1975 est une année très proche des années normales avec une très bonne répartition des pluies (230 mm entre la mi-février, début tallage du blé et fin juillet, juste avant la récolte). Malgré ces apports d'eau importants et probablement à cause des nombreuses périodes de beau temps sec, on a pu observer des évapotranspirations potentielles calculées (PENMAN) souvent élevées, la somme de ces valeurs pendant la période citée (mi-février à la récolte fin juillet) ayant été d'environ 470 mm.

— L'année 1976 n'a reçu que très peu d'eau puisque les pluies n'ont atteint que 70 mm pendant la même période. Ces conditions très sèches ne furent pas associées à un ensoleillement très supérieur, ni à des déficits de saturation de l'air constamment élevés ; aussi la somme des évaporations potentielles calculées ne fut que de 10 p. 100 supérieure à celle de 1975, soit 470 mm pour toute la période de végétation (mi-février à la récolte, mi-juillet). La différence entre ces deux années se traduit à travers la durée de végétation, période un peu plus courte en 1976 consécutive à une maturité plus rapide du blé (15 jours environ).

IV. — Discussion et comparaison des modèles

Une analyse statistique sur l'ensemble des données de 1975, puis de 1976 a été faite, pour déterminer pour chaque modèle la valeur de α et par conséquent des paramètres (a_i, b_i, c_i) qui permettent de le déterminer.

1. — *Comparaison des modèles*

Le tableau 1 représente pour chacun des modèles envisagés et pour chaque année leurs caractéristiques : le coefficient de corrélation et le coefficient de la régression entre ETR estimée par le modèle et ETR observée.

TABLEAU 1

Caractéristiques statistiques des ajustements testés

— coefficient de corrélation
— biais (pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR mesurée)

	Modèle	Blé 75		Blé 76	
		Coeff. de corrélation	Pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR observée	Coeff. de corrélation	Pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR observée
I	$\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \varphi_o)$	0,90	0,86	0,91	0,85
II	$\alpha^* = Cte$	0,92	1,05	0,80	1,17
III	$\alpha = aR_n + b$	0,92	1,01	0,76	1,15
IV	$\alpha = \frac{a}{r_c} + b$	0,92	1,04	0,83	1,15
V	$\alpha = a(Ta\text{-}Tr) + b$	0,89	1,01	0,88	1,08
VI	$\alpha = a\,\Delta H + bLAI + c$	0,96	1,03	0,93	1,02
VII	$\alpha = a\,\Delta H + \frac{b}{r_c} + c$	0,94	1,03	0,91	1,01
VIII	$\alpha = a\,\Delta H + b\,\frac{\Delta H}{r_c} + c$	0,94	1,03	0,92	1,03
IX	Modèle complet	0,97	1,01	0,96	1,00

* α est défini comme suit $\frac{Y_R - Y_h}{Y_R}$ avec Y_h et Y_R déficits de saturation de l'air respectivement au niveau de la surface du couvert (h) et de référence (R).

— Le modèle I, qui suppose une valeur moyenne de α nulle, réduit l'évapotranspiration réelle à une fonction simple de R_n et φ_0. Cette solution permet d'expliquer respectivement pour 1975 et 1976, 81 et 84 p. 100 de la variation. Toutes les autres solutions considèrent l'évapotranspiration réelle comme fonction de cette première expression $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ (relation 5). Il est à noter, pour cette première estimation, que l'étude de la régression entre valeurs estimées et mesurées montre une remarquable stabilité d'une année à l'autre malgré leur différence sous l'angle hydrique mais une sous-estimation d'environ 15 p. 100 (pente de 0,86 et 0,85). On verra au chapitre suivant, l'intérêt pratique que l'on peut tirer de ces deux constatations.

— Le modèle II ne donne pas d'amélioration sensible par rapport à la version précédente. S'il y a une légère amélioration en 1975, on constate en 1976, une nette

dégradation du coefficient de corrélation donc de la variation expliquée. Cette instabilité dans le temps, assez compréhensible, fera rejeter ce type de formulation. En effet, la relation (7) soulignait que Y_h, et par conséquent α, dépendait du climat et de la régulation du couvert. Aussi, en année normale, par le jeu des résistances en présence, il est possible d'admettre $\alpha = \text{Cte} \neq 0$; par contre, pour une année sèche à forte régulation biologique α variera beaucoup, entraînant ainsi un mauvais coefficient de corrélation. Ces constatations concernant ce modèle II se vérifient puisque les estimations sont bonnes en 1975 (pente de la droite de régression égale à 1) et plus mauvaise en 1976 (pente de 1,17, soit une surestimation moyenne de 17 p. 100).

— Les modèles suivants III, IV et V, qui font intervenir des variables climatiques, ne présentent finalement pas un très grand intérêt. En effet, ils compliquent le modèle sans pour cela améliorer de façon nette le coefficient de corrélation par rapport au premier modèle ; on constate même une diminution sensible de ce coefficient pour 1976, comme pour le modèle II, quoique les pentes des droites de régression soient voisines de l'unité en 1975 et tout aussi différentes de l'unité en 1976 que pour les modèles précédents. Seul le modèle V présente un avantage marqué sur les modèles II, III et IV par son coefficient de corrélation plus élevé en 1976, de plus très stable dans le temps (0,89 et 0,88) et par la pente de la droite de régression proche de l'unité (1,01 et 1,08). Son intérêt n'est donc pas entièrement négligeable devant le modèle I, à sa complexité près, puisque si les coefficients de corrélation sont légèrement plus faibles que pour le modèle I, les pentes des droites de régression sont significativement plus proches de l'unité que pour le modèle I.

— Le modèle VI dit « biologique », par opposition à climatique puisque ses deux variables ΔH et LAI dépendent pour une large part des processus de croissance et de régulation stomatique, apparaît très satisfaisant. En effet, on constate un coefficient de corrélation bien meilleur que précédemment (0,96 et 0,93) et qui atteint pratiquement la valeur obtenue par celui de l'ajustement statistique général (modèle IX) ainsi que des pentes des droites de régression (1,03 et 1,02) très voisines de l'unité. Nous discuterons de la stabilité de cet ajustement par la suite.

— Les deux modèles suivants (VII et VIII) un peu plus complexes que les précédents (3 variables : ΔH, R_n et Y_R au lieu de 2) se révèlent aussi légèrement moins efficaces et par conséquent ne se justifient pas par rapport au précédent.

De ces trois modèles, nous retiendrons surtout le modèle VI qui offre les meilleurs résultats, en tenant compte par l'intermédiaire des deux variables ΔH et LAI, des effets du couvert :

$$\alpha = a_6 \Delta H + b_6 \text{LAI} + c_6.$$

2. — *Discussion et choix des solutions*

Nous allons choisir parmi ces huit modèles, fondés sur la relation (2 ou 8), celui qui satisfait aux qualités suivantes :

• La meilleure estimation (pente voisine de 1), une bonne précision (coefficient de corrélation élevé) et une stabilité dans le temps suffisante ; pour cela, nous aurons à les comparer au modèle IX basé sur l'analyse du bilan d'énergie et dans lequel nous avons traité sous l'angle statistique le plus général X, variable dominante de la relation (4). Le tableau 1 en précise les caractéristiques statistiques : coefficient de

corrélation élevé, 0,97 et 0,96 et une bonne estimation ; cependant, ces résultats très intéressants sont obtenus avec un grand nombre de variables qui ne permet plus d'analyser les liens de causes à effets et rendent la formulation très peu aisément utilisable.

L'analyse précédente a montré que dans l'ordre croissant de complexité, les modèles I, VI et IX présentaient un bon critère de choix : la stabilité des performances obtenues pour les deux années très différentes sous l'angle hydrique. En fait, plus que cette stabilité des performances, il est nécessaire que le modèle testé en 1975 soit applicable en 1976 et vice-versa ; c'est donc une constance des coefficients a_i, b_i, c_i pour les deux années qu'il faut aussi tester.

Le tableau 2 donne pour chacune de ces années les coefficients trouvés ; le modèle IX présentant une certaine instabilité, on ne s'étendra pas sur ce modèle, cependant intéressant par ses performances, puisque nous le développerons par ailleurs. Quant au modèle I, de beaucoup le plus simple et le plus stable, il sera repris au chapitre suivant, car il présente la variation expliquée la plus faible parmi les modèles retenus et la pente de la droite de régression ETR estimée par rapport à ETR mesurée la plus différente de l'unité. Le modèle V, quant à lui, montre apparemment une mauvaise stabilité du coefficient « a », mais elle est essentiellement due aux valeurs de Y_R plus élevées en 1976 qu'en 1975 parce que le niveau de référence ne fut pas le même. Aussi, ce modèle peut être considéré comme stable et s'il n'apporte guère plus d'explications au niveau de la dispersion que le modèle I, la valeur des pentes de la droite de régression est meilleure car plus proche de l'unité (1,01 et 1,08). Pour des raisons de stabilité et de meilleure explication de la dispersion, le modèle VI sera analysé plus en détail. En effet, il faut souligner la très bonne stabilité des coefficients a_6 et b_6 d'une année sur l'autre, seule la valeur de la constante c_6 diffère notablement, pour la même raison que pour le modèle V. Cette efficacité et cette stabilité du modèle VI sont essentiellement dues au fait que l'on cherche à expliquer à partir uniquement de deux termes liés au couvert (ΔH et LAI) une variation résiduelle fonction de Y_R par

TABLEAU 2

Valeurs des coefficients de régression a, b, c, d pour les modèles les plus performants (I, V, VI et IX)

		a	b	c	d
Modèle I	1975	0	0		
	1976	0	0		
Modèle V	1975	0,014 8	0,199 7		
	1976	0,008 6	0,218 2		
Modèle VI	1975	0,001 7	0,016 5	0,435	
	1976	0,001 7	0,013 5	0,138	
Modèle IX	1975	0,009 74	— 0,207	— 0,021 3	— 0,114
	1976	0,008 17	— 0,06	— 0,013 9	— 0,289

rapport à un terme principal $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ très stable d'une année sur l'autre (modèle I). Face au modèle IX, performant mais instable donc d'emploi difficile, nous avons le modèle I simple, très stable, mais donnant une estimation systématiquement biaisée. Entre ces deux modèles extrêmes, les modèles V et VI fournissent malgré la différence de nature des variables explicatives, des résultats similaires. Il est possible de donner l'interprétation suivante de cette convergence : dans une zone à contraste faible entre les cultures, le déficit de saturation au-dessus de cette culture est imposé par les conditions hydriques de celle-ci, soit, notamment ΔH ; cette remarque est en bonne concordance avec les idées développées par Bouchet et Perrier (1973). A titre d'illustration, les figures 1*a* et 1*b* représentent les résultats des régressions dans le cas du modèle VI entre l'ETR estimée en ordonnée et l'ETR observée en abscisse, pour chacune des années. Les figures 1*c* et 1*d* montrent la bonne stabilité dans le temps des ajustements puisqu'ils illustrent le résultat du modèle 1975 avec les données de 1976 et vice-versa. Ce modèle VI nécessite cependant presqu'autant de paramètres à mesurer que le modèle IX mais, compte tenu de sa bonne stabilité dans le temps, il pourra se généraliser plus sûrement. Cette formulation intéressante pour analyser les différents effets des paramètres climatiques et biologiques sur l'ETR d'une culture de blé pose, au niveau de la vulgarisation, les problèmes relatifs au nombre de mesures à effectuer ou de grandeurs à définir (R_n, Y_R, H, φ_0, ΔH, LAI). Aussi, dans une optique très pratique, une amélioration du modèle I reste une des voies les plus intéressantes. Notons cependant, que toutes ces analyses nous ont montré d'une part, le rôle des facteurs climatiques, et d'autre part au niveau du coefficient α la dominance de ΔH, LAI ou dans une certaine mesure de Y_R.

V. — Modèle simplifié et applications pratiques

Lors de la discussion des résultats généraux (tabl. 1) nous avons remarqué la simplicité et la stabilité du modèle I conduisant à :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) . \qquad (9)$$

Une telle relation permet d'expliquer, quelle que soit l'année, 81 et 84 p. 100 de la variation, précision souvent suffisante pour de nombreuses applications pratiques. De plus, cette estimation de l'ETR ne demande seulement que deux mesures spécifiques R_n et φ_0 et l'utilisation des données météorologiques classiques de réseau T_a, T_R pour calculer $\frac{P'}{P' + \gamma}$. C'est donc une formule d'une grande simplicité d'utilisation.

Il faut tout de même signaler que l'utilisation de la formule $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ pour estimer ETR, introduit des écarts plus ou moins systématiques suivant la plante et surtout ses conditions hydriques. Ces écarts apparaissent lors du test (ETR estimée, ETR mesurée) sous la forme d'une divergence (0,86 pour le blé en 1975 et 1976). Il est donc possible d'écrire (relation 5) :

$$ETR_{BLÉ} = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \qquad (5)$$

avec : pour 1975-1976 : $k = 1{,}16$.

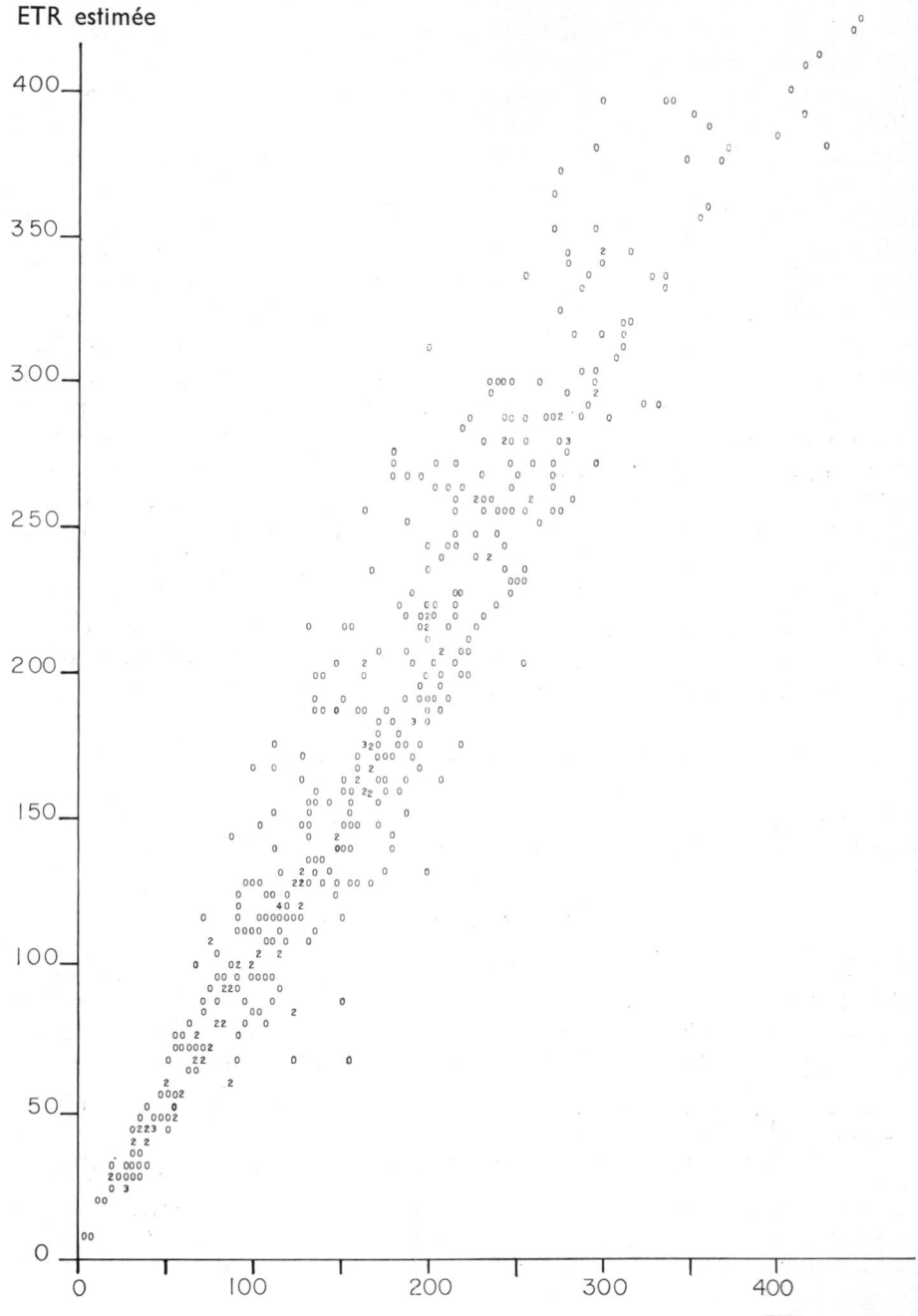

ETR estimée
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
100
200
300
400
ETR mesurée

FIG. 1*a*.

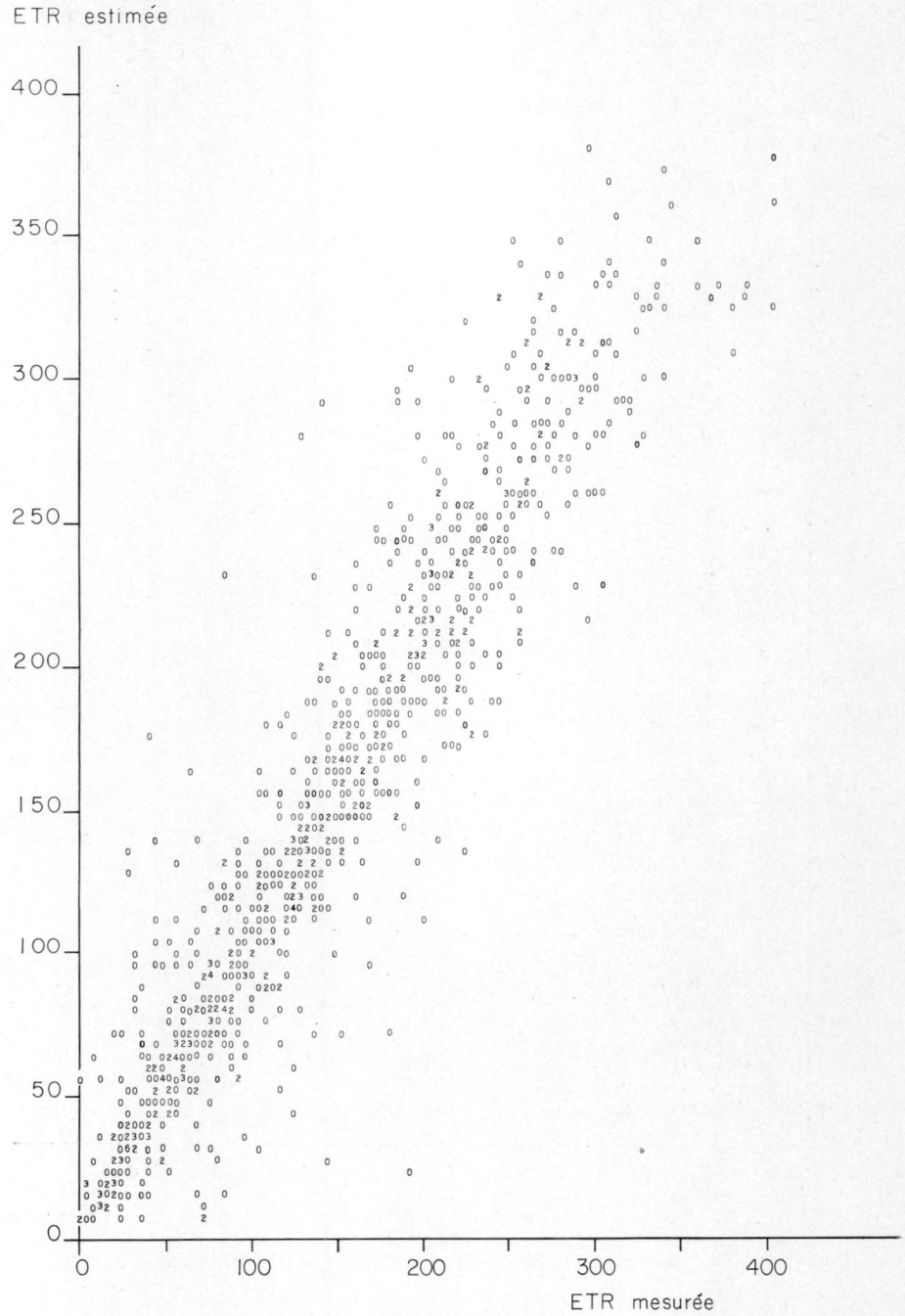


FIG. 1*b*.

FIG. 1*b*. — *Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI et l'ETR mesurée* (a = année 1975, b = année 1976).

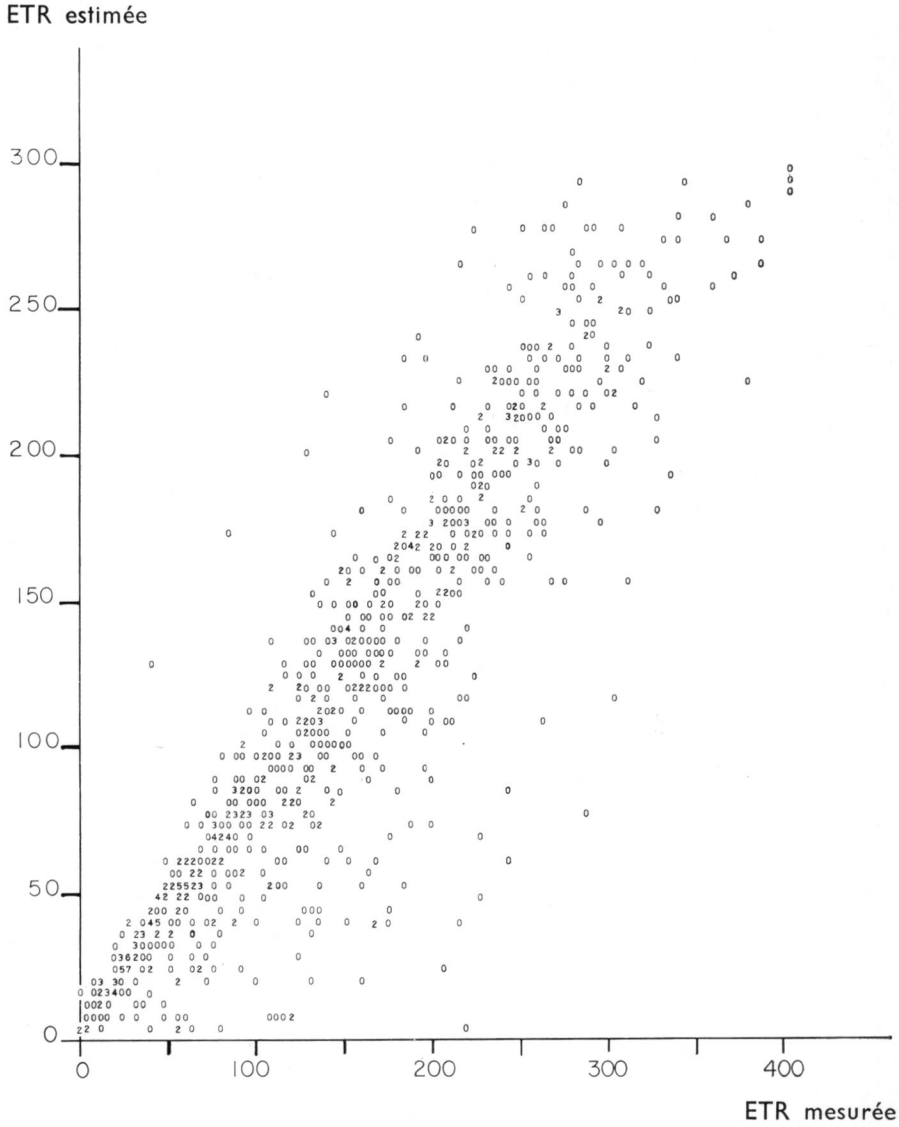


FIG. 1c. — *Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI 1975 et l'ETR mesurée 1976.*

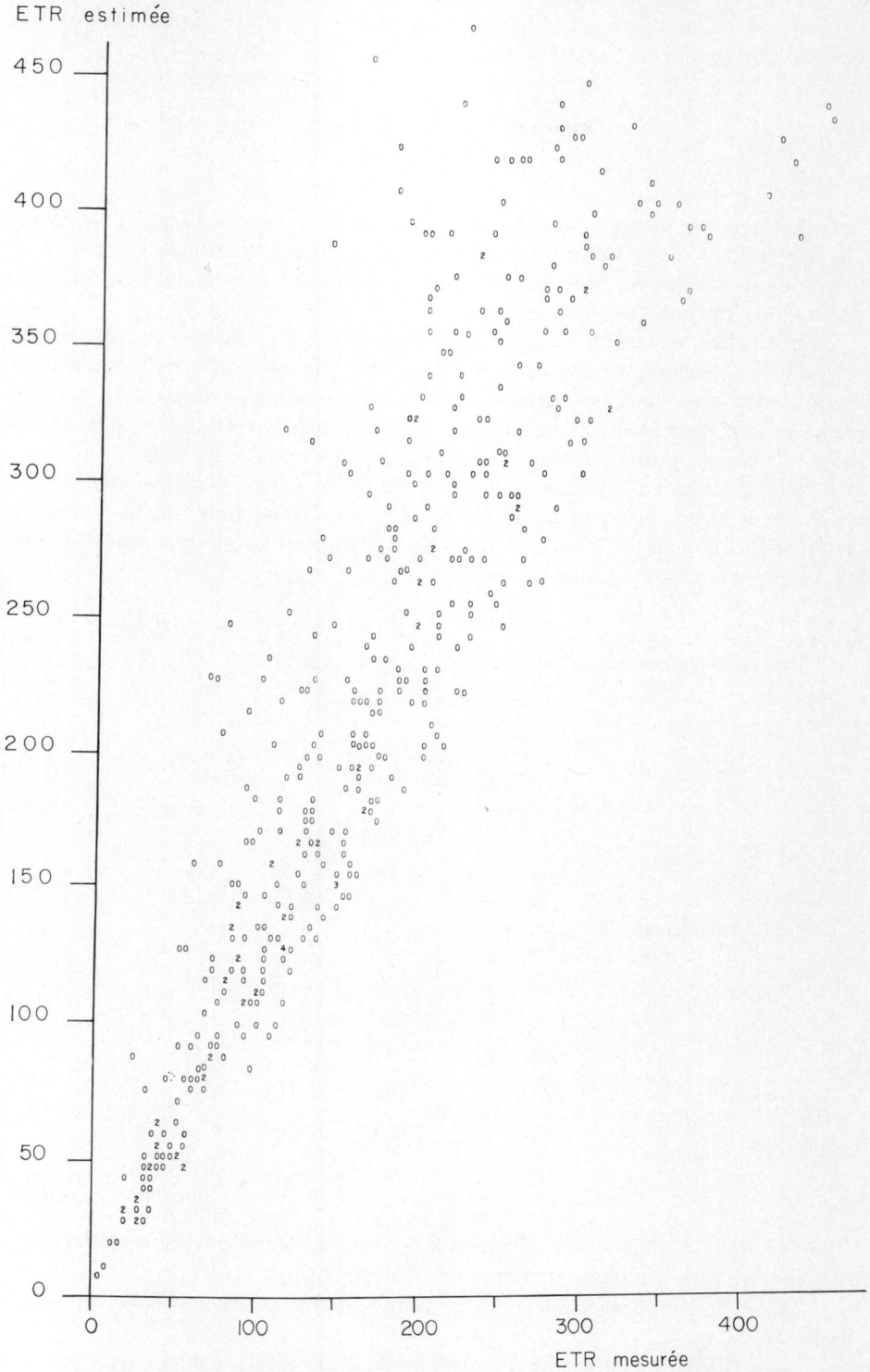


FIG. 1*d*. — *Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI* 1976 *et l'ETR mesurée* 1975.

Il est intéressant de rappeler le parallèle signalé entre cette formulation et celle proposée précédemment, relation (3) :

$$k = \frac{1 + \dfrac{\gamma}{P' + \gamma}\dfrac{r_c}{r_a}}{1 + \dfrac{\gamma}{P' + \gamma}\dfrac{r_v}{r_a}}.$$

Le fait que l'on puisse écrire la relation (5) montre qu'en moyenne la résistance de la végétation r_v varie dans le même sens que la résistance critique r_c ; des résultats similaires avaient été obtenus par ailleurs sur gazon (Gosse, 1976) et sur maïs (Perrier, résultat non publié).

Ce coefficient, qui traduit, entre autres, la réaction moyenne du couvert végétal aux conditions climatiques et hydriques, peut être interprété comme un coefficient cultural moyen pour la culture étudiée, aussi sera-t-il en partie fonction du développement de la culture. Ainsi, il est possible de penser qu'on peut affiner cette estimation en délimitant, dans le temps, des stades de végétation bien définis.

Le tableau 3 donne la valeur du coefficient k et du coefficient de corrélation pour chaque année et pour chacun des stades ainsi que pour l'ensemble de la période de végétation (l'ordonnée à l'origine b n'était pas significativement différente de zéro, nous l'avons considérée comme nulle).

TABLEAU 3

Valeurs des caractéristiques de l'ajustement de la formule $ETR = k.\dfrac{P'}{P' + \gamma}.(R_n + \varphi_o)$ *selon le stade de végétation*

		Coefficient corrélation	Valeur du coefficient k
Tallage	1975	0,966	1,29
	1976	0,979	1,46
Montaison	1975	0,933	1,35
	1976	0,942	1,40
Epiaison	1975	0,950	1,34
	1976	0,951	1,23
Maturation	1975	0,939	0,97
	1976	0,950	0,96
Tous Stades	1975	0,900	1,16
	1976	0,914	1,16

Si l'on teste les différents coefficients k pour définir ceux qui peuvent être considérés comme significativement différents, il apparaît :

— pour 1975, aucune différence significative entre les trois premiers stades dits « stades verts » ;

— pour 1976, une différence apparaît dès le stade épiaison et l'on peut attribuer

ce changement à la sécheresse ; dans ce stade, la plante évolue et réduit ses échanges en eau, alors que ce phénomène n'est vraiment net que pendant la maturation en 1975.

Pour ces trois stades, on peut prendre $k = 1{,}34$.

Par contre, le stade maturation se démarque nettement des autres pour les deux années et prend la valeur moyenne $k = 0{,}96$.

Les figures 2*a* et 2*b* illustrent les résultats précédents.

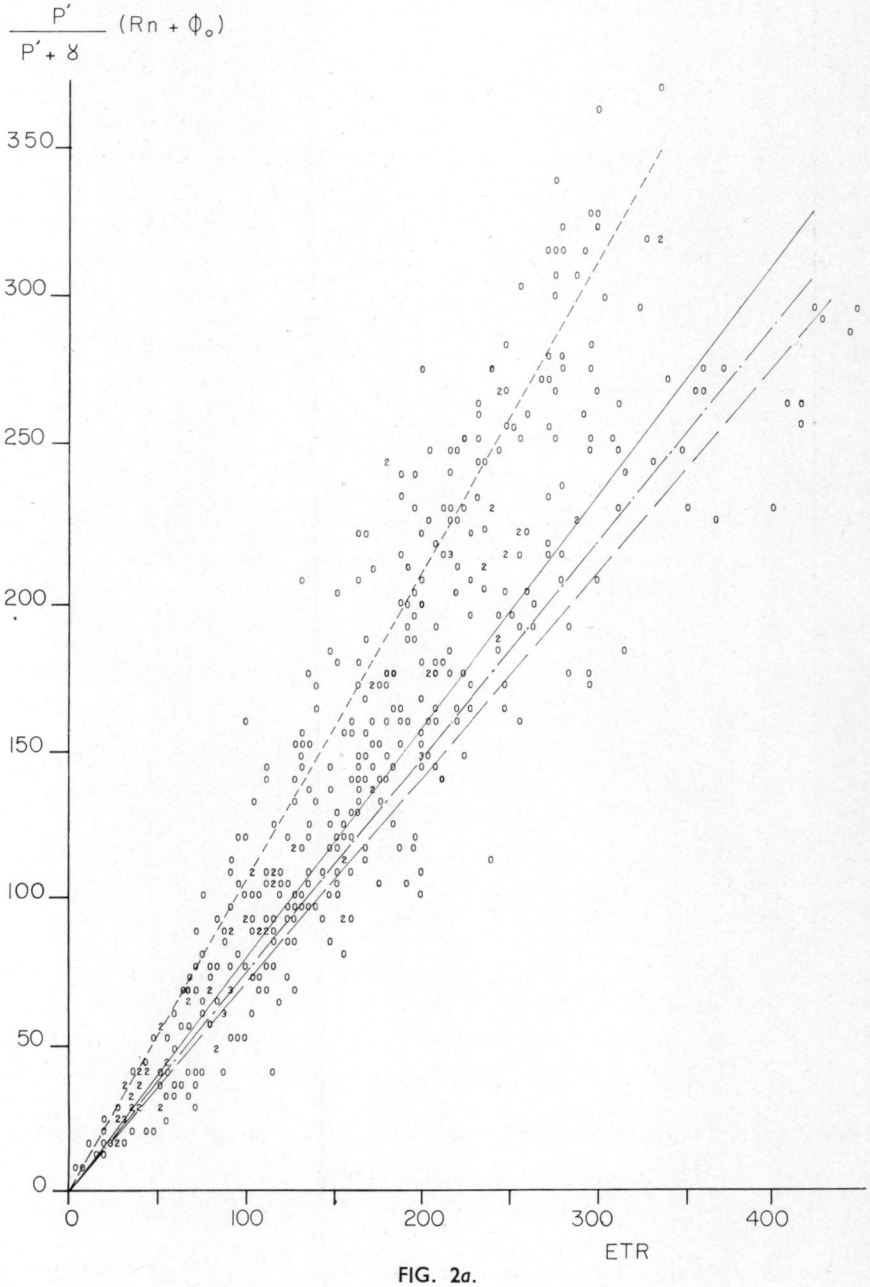


FIG. 2*a*.

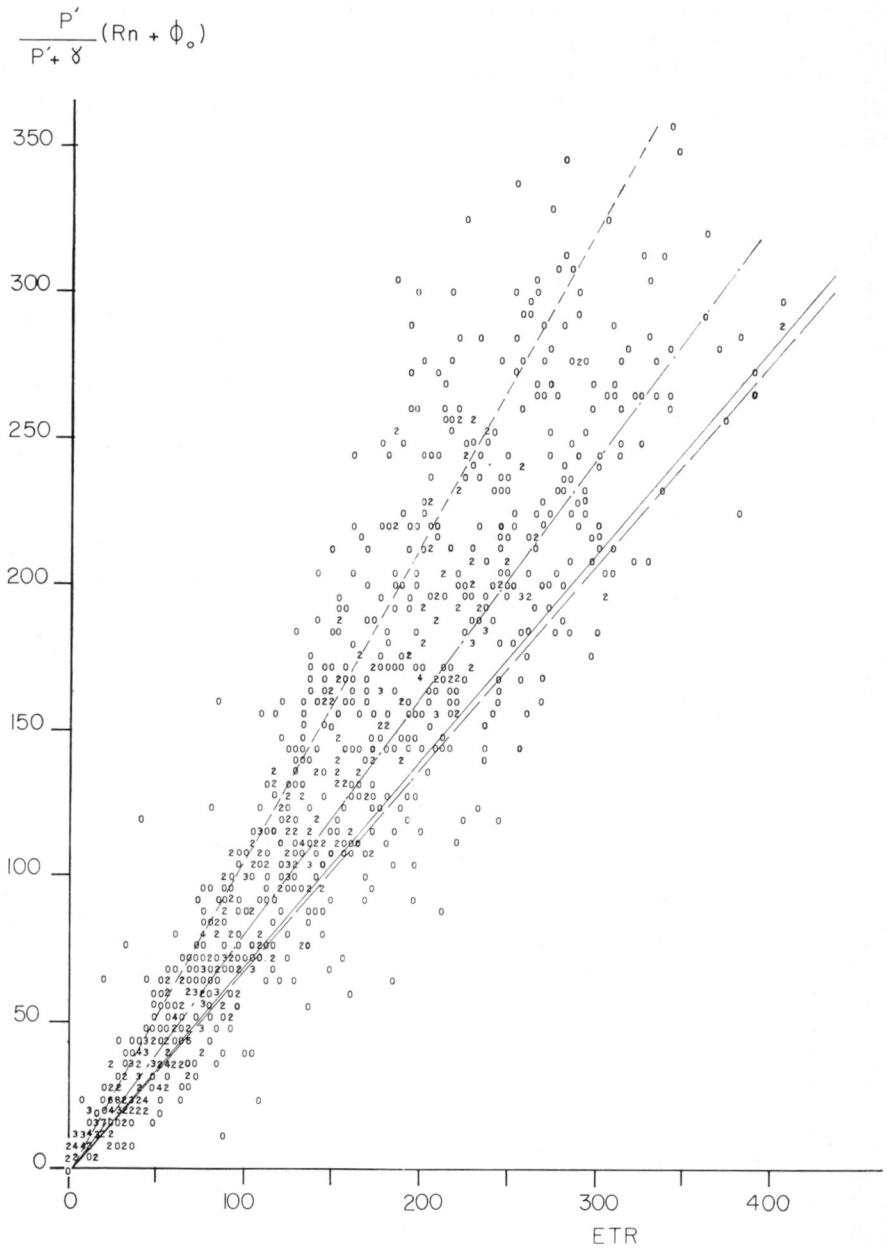


FIG. 2*b*.

FIG. 2*ab*. — *Evolution de l'ETR en fonction du terme* $\frac{P'}{P'+\gamma}(R_n + \varphi_0)$ *selon le stade de végétation* (a = année 1975, b = 1976).

——— Tallage
— — — Montaison
- - - - - - - Maturation
—·—·— Epiaison

Cette étude montre, d'une part, qu'il est possible de cerner au mieux les besoins en eau de la plante à partir de cette relation simple et, d'autre part, qu'un certain vieillissement apparaît lié à l'évolution du métabolisme de la plante. Les conséquences de cette évolution se traduisent par une réduction de l'évapotranspiration réelle de la culture.

Conclusion

Plusieurs modèles de complexité variable, intégrant plus ou moins bien la plante, sont donc envisageables (modèles I, V et VI) ; le choix demeure lié à l'utilisation qui en sera faite. Tous se basent sur une expression analytique qui traduit bien l'action directe des facteurs climatiques sur l'évapotranspiration, la répercussion de ces facteurs au niveau de la régulation biologique étant appréhendée pour un couvert donné, par analyse statistique sur le très grand nombre de données fiables et précises obtenues à l'aide du système BEARN.

Si le modèle VI présente sous cet angle un grand intérêt puisqu'il intègre l'action du déficit hydrique du sol ΔH qui pourrait être corrigé en fonction des connaissances de l'enracinement des plantes et du type de sol considéré, celle de la surface foliaire (LAI) et par ses coefficients, a, b, c, celle des caractéristiques propres à la culture, il n'en reste pas moins, comme on l'a déjà souligné, que ce modèle reste assez complexe d'emploi.

Aussi, d'un point de vue pratique et pour des échelles d'espace allant de la parcelle à la petite région, la formulation :

$$ETR = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

s'avère être la plus utile. En effet, elle fait appel à des paramètres relativement simples à mesurer et de plus, elle est facilement transposable à des échelles de temps supérieures (jour, décade...). Rappelons aussi que cette formule, appliquée à d'autres cultures (gazon, maïs, ananas) et sous d'autres climats, a donné des résultats similaires à ceux obtenus sur blé que nous venons d'analyser. Il serait cependant intéressant de tester cette relation en climat semi-aride, soit dans le cas où ETR serait très fortement influencée par des déficits hydriques importants, soit dans le cas où une zone irriguée (ETR_{max}) serait soumise à une forte advection générale due au climat semi-aride.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Study of the actual evapotranspiration of a wheat field in the Parisian region

Numerous measurements of actual evapotranspiration of a wheat field have been made by the energy balance method. These data were analysed statistically to estimate the values of variables which it is difficult to measure, such as saturation deficit at the top of the canopy Y_h. We suggested

several models to estimate actual evapotranspiration of a wheat field, the results of which were compared in table 1. Determination of k as defined by the simplest formula :

$$ETR = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

with $\frac{P'}{P' + \gamma}$ function of the wet bulb temperature

R_n, net radiation

φ_0, heat flux exchanged by conduction with the soil,

showed it to be systematically dependent on the age of the crop.

Zusammenfassung

Untersuchung der reellen Evapotranspiration eines Weizenfeldes im Pariser Becken

Die Bestimmung zahlreicher Werte der ETR eines Weizenfeldes auf Grund der Energiebilanzmethode ermöglichte die Anwendung statistischer Methoden zur Schätzung gewisser Variablen, die in der Praktik schwierig zu messen sind, besonders das Sättigungs-defizit auf der Oberfläche der Yh-Decke. Diese Annäherung führte dahin, verschiedene Modelle zur ETR-Schätzung für die untersuchte Kultur vorzuschlagen. Eine Synthese der Ergebnisse ist in Tabelle 1 dargestellt. Eine genauere Untersuchung der einfachsten Formulierung

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

mit $\frac{P'}{P' + \gamma}$ als Konstante

R_n = reine Strahlung

φ_0 = mit dem Boden durch Leitung ausgetauschter Wärmestrom

veranlasste uns, verschiedene k-Koeffizienten vorzuschlagen (Tabelle 3) je nach Alter und phenologischem Stadium der untersuchten Kultur.

РЕЗЮМЕ

Изучение реальной эвапотранспирации культуры пшеницы в парижском бассейне.
Госс Г., Перрье А., Итье Б.

Определение многочисленных величин ЕТЯ культуры пшеницы при помощи метода энергетического баланса, позволило применить статистические методы для оценки некоторых переменных, трудно поддающихся измерению на практике, как например, дефицит насыщения $У_h$. Это позволило предложить разные модели оценки ЕТЯ для изучаемой культуры. Синтез результатов представлен в таблице И° 1. Более точное изучение формулировки

$$ЕТЯ = П \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (Я_n + \varphi_0)$$

с постоянным $\frac{P'}{P' + \gamma}$, и в которой $Я_n$ представляет чистое издучение, а φ_0 — тепловой поток кондуктивно обменивающийся с почвой, — позволило предложить различные коэффициенты к-в зависимости от возраста культуры и фенологической стадии которую она проходит (таблица И° 3).

Références bibliographiques

BERGER, 1970. Le potentiel hydrique et la résistance à la diffusion dans les stomates indicateurs de l'état hydrique de la plante. *Actes du Colloque d'Uppsala*, UNESCO, Paris, 1973.

BOUCHET R. J., 1964. Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. In *L'eau et la production végétale* (Ed. INRA), 151-241.

BOUCHET R. J., PERRIER A., 1973. Bilan d'énergie et évapotranspiration à différentes échelles. *Soleil au service de l'homme*. UNESCO, Paris 2-6/7/73, 27 p.

DJAVANCHIR A., 1970. Mise au point d'une chambre de transpiration pour mesurer la résistance stomatique. *Oecol. plant.*, **5**, 3, 301-318.

GOSSE G., 1976. Evapotranspiration et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide. *Ann. agron.*, **27**, (2), 141-163.

GOSSE G., PERRIER A., ITIER B., 1977. Estimation de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. Publication en cours.

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, Ser. A, **193**, 120-145.

PERRIER A., 1970. Absorption de l'énergie radiative par un couvert végétal. Influence de celui-ci sur l'intensité des flux en présence. Application au calcul de l'évapotranspiration. In *Rayonnement solaire et hydrométéorologie*. C. R. séance d'étude Soc. Fr. Therm., section énergie solaire, AFEDES, 28 p.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspirations réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (3), 229-243.

PERRIER A., 1976. *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris VI.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J. M., KATERJI N., 1976. A new device for continuous recording of the energy balance of natural surfaces. *Agric. Met.*, **16**, 71-84.

SHAWCROFT R. W., LEMON E. R., 1970. Estimation of internal crop water status from meteorological and plant parameters. Actes du colloque d'Uppsala, UNESCO, Paris, 1973.

THORNTHWAITE C. W., 1948. *Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere*. The John Hopkins. Lab. Climatol. Yearbook, New Jersey.

TURC L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.* **12**, 13-49.

Ann. agron., 1977, **28** (5), 543-560.

Etude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet)
I. — Evolution du trouble pendant le 1er semestre 1976

A. BAILLE et Marie MERMIER

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Cet article présente les résultats concernant l'évolution du trouble atmosphérique dans un site semi-rural (Montfavet) pendant le premier semestre de 1976. Après un bref rappel des définitions et des significations des divers paramètres caractérisant le trouble atmosphérique, les résultats sont présentés et discutés en considérant d'une part l'évolution à court terme (journalière), d'autre part l'évolution à long terme (mensuelle). On a notamment pu mettre en évidence une forte corrélation entre les paramètres du trouble (facteur de trouble de Linke T, coefficient de trouble d'Angström β) et le rapport du rayonnement diffus sur le rayonnement global D/R_G.

Introduction

Les constituants atmosphériques, gazeux et particulaires, d'origine naturelle et anthropogénique, modifient qualitativement et quantitativement le rayonnement solaire direct lors de son trajet à travers l'atmosphère avant d'atteindre la surface terrestre. Ces modifications sont dues essentiellement à l'absorption sélective par les gaz et à la diffusion par les particules. Pour désigner cette atténuation globale du rayonnement direct lorsqu'il n'y a pas de couverture nuageuse, on utilise en général le vocable de « trouble atmosphérique ». Outre les conséquences directes sur les bilans radiatifs de l'atmosphère et de la surface, le trouble atmosphérique influe sur le taux de photosynthèse des végétaux (Mc Cree et Keener, 1973). En dehors de cet aspect agronomique, le trouble, qui est relié assez étroitement avec le niveau global de pollution d'une région, constitue un facteur important à prendre en compte pour une meilleure compréhension des variations de la pollution de fond.

Ces deux facteurs justifient l'intérêt croissant qui s'est manifesté ces dernières années pour la mesure et la caractérisation du trouble atmosphérique. Au début du siècle, Angström, Linke, Schüepp furent les premiers à essayer de le mesurer. Ils ont d'ailleurs laissé leur nom à des facteurs ou des coefficients caractérisant le trouble atmosphérique. A l'apparition des premières manifestations graves de la pollution industrielle, et notamment des conséquences des émissions de gaz et de poussières de diamètre et de composition très variable, les études sur le trouble atmosphérique ont accusé un regain d'intérêt certain. Des travaux (Joseph et Manes, 1971 ;

Mani *et al.*, 1973) ont montré un accroissement constant du trouble atmosphérique pouvant atteindre jusqu'à 20 p. 100 par décennie dans les zones les plus industrialisées du globe. Il est à noter aussi que certains phénomènes naturels (éruptions volcaniques par exemple) peuvent apporter leur contribution dans cet accroissement (Dyer, 1974).

Dans le cadre des recherches effectuées par le Département de Bioclimatologie de l'INRA sur les problèmes relatifs à la pollution atmosphérique, à ses incidences sur le climat et la production agricole, un programme de recherches portant sur la détermination du trouble atmosphérique et de ses relations avec les niveaux de pollution a été entrepris. Ce sont les premiers résultats d'une série de 6 mois de mesures réalisées à la Station de Bioclimatologie d'Avignon-Montfavet que nous présentons et discutons dans ce premier article. Une seconde partie sera proposée ultérieurement qui concernera l'étude des variations du trouble atmosphérique en fonction de divers paramètres climatiques (pluviométrie), des situations synoptiques et du niveau moyen de pollution. Avant la présentation des résultats, il nous a semblé opportun de faire un bref rappel des lois de transfert radiatif à travers l'atmosphère et des définitions des paramètres caractérisant le trouble atmosphérique.

II. — Rappels

II.1. — *Coefficients d'extinction*

En l'absence de couverture nuageuse, l'atténuation de l'énergie solaire incidente est due aux trois causes suivantes :

— à la diffusion par les molécules d'air et par les particules de dimension inférieure à la longueur d'onde λ. Cet effet de diffusion moléculaire, appelé effet Rayleigh, est proportionnel à λ^{-4} ;

— à l'absorption sélective par les gaz atmosphériques (O_2, O_3, H_2O, CO_2, etc...) ;

— à la diffusion et la réflexion par les particules et les aérosols présents dans l'atmosphère.

On peut caractériser cette atténuation par un coefficient d'extinction $a'(\lambda)$, fonction de la longueur d'onde, qui englobe les phénomènes d'extinction cités plus haut. La loi fondamentale d'extinction du rayonnement, ou loi de Beer, s'écrit, pour une couche d'air d'épaisseur dx :

$$dI(\lambda) = - I(\lambda) . a'(\lambda) . \rho . dx \qquad (1)$$

avec

$I(\lambda)$ = intensité du rayonnement incident
$dI(\lambda)$ = atténuation du rayonnement
ρ = densité de la couche d'air.

L'intégration de la relation (1) le long du chemin optique donne :

$$I(\lambda) = \frac{1}{S} I_0(\lambda) . \exp \left[- \int_0^x a'(\lambda) . \rho . dx \right] \qquad (2)$$

où $S = R^2/R_m^2$ est le facteur de correction de la constante solaire, égal au rapport du carré de la distance réelle R terre-soleil sur le carré de la distance moyenne R_m.

En faisant l'hypothèse que $a'(\lambda)$ n'est fonction que de la longueur d'onde λ, la relation (2) s'écrit :

$$I(\lambda) = \frac{1}{S} I_0(\lambda) \exp\left[-a(\lambda).m_r\right] \tag{3}$$

avec

$$a(\lambda) = \int_0^h a'(\lambda).\rho.dh \tag{4}$$

coefficient d'extinction total dans la direction verticale sur une tranche d'atmosphère d'épaisseur h (fig. 1) et

$$m_r = \frac{\int_0^x a'(\lambda).\rho.dx}{\int_0^h a'(\lambda).\rho.dh} \tag{5}$$

masse d'air relative.

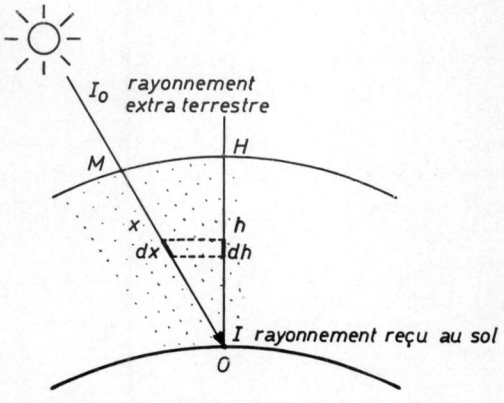


FIG. 1. — *Schéma du parcours optique du rayonnement solaire dans une couche d'atmosphère d'épaisseur* h.

Soient $a_R(\lambda)$, $a_D(\lambda)$ et $a_W(\lambda)$ les coefficients d'extinction respectifs de Rayleigh, des aérosols et des gaz atmosphériques. On a :

$$a(\lambda) = a_R(\lambda) + a_D(\lambda) + a_W(\lambda) . \tag{6}$$

En l'absence d'aérosols et de gaz, le rayonnement incident vaudrait :

$$I_R = \frac{1}{S} \int_0^\infty I_0(\lambda).e^{-a_R(\lambda)\cdot m_r} d\lambda . \tag{7}$$

On définit alors le coefficient moyen d'extinction de Rayleigh, $\overline{a_R}$, par la relation :

$$I_R = \frac{1}{S} I_0.e^{-\overline{a_R}\cdot m_r} \tag{8}$$

avec

$$I_0 = \int_0^\infty I_0(\lambda) . d\lambda. \tag{9}$$

On peut définir de même des coefficients d'extinction moyens pour les aérosols, $\overline{a_D}$, et pour les gaz, $\overline{a_W}$, ainsi qu'un coefficient moyen global d'extinction, $\bar{a}$, tel que

$$\bar{a} = \overline{a_R} + \overline{a_D} + \overline{a_W} \tag{10}$$

on a alors :

$$I = \frac{1}{S} . I_0 e^{-\bar{a} \cdot m_r} \tag{11}$$

II.2. — *Paramètres caractéristiques du trouble*

Plusieurs paramètres permettant de caractériser le trouble atmosphérique ont été proposés par différents auteurs. Nous les présentons brièvement ci-dessous.

II.21. — *Facteur de trouble global de Linke*, T.

Linke, prenant pour effet de base l'atténuation due à la diffusion moléculaire, définit le facteur de trouble global T par la relation :

$$T = \frac{\bar{a}}{\overline{a_R}} = 1 + \frac{\overline{a_D}}{\overline{a_R}} + \frac{\overline{a_W}}{\overline{a_R}} . \tag{12}$$

T est donc un nombre sans dimension indiquant combien d'atmosphères pures et sèches produiraient le même effet total d'atténuation que l'atmosphère réelle.

Dans la pratique, T est obtenu à partir des relations (11) et (12) :

$$T = \frac{\bar{a}}{\overline{a_R}} = 2{,}3(m_r . \overline{a_R})^{-1} \log \left(\frac{I_0}{I} \cdot \frac{1}{S}\right) = P(m) . \log \left(\frac{I_0}{I} \cdot \frac{1}{S}\right) \tag{13}$$

avec

$$P(m) = 2{,}3(m_r . \overline{a_R})^{-1} . \tag{14}$$

P(m) est donné par des tables ou des abaques en fonction de la masse relative d'air (voir par exemple Robinson, 1963). I_0 et S sont connus. L'unique mesure nécessaire est celle de I, intensité totale de rayonnement incident. L'inconvénient de l'utilisation de T réside dans le fait qu'il dépend de la masse relative de l'air m_r, de par la définition même des coefficients moyens d'extinction $\overline{a_R}$ et $\bar{a}$ (relations 7 et 8). D'où des variations virtuelles de T au cours d'une journée, même si le trouble est resté constant pendant cette même journée. T varie de 2 (ciel pur) à 6 (ciel très trouble).

Linke a également proposé un facteur de trouble nouveau, θ, basé sur une atmosphère d'air pur contenant 1 cm d'eau précipitable. Cependant, ce nouveau facteur n'élimine pas entièrement les variations virtuelles, tout en étant plus délicat à interpréter que T. Aussi est-il très peu utilisé.

II.22. — *Facteur de trouble de courte longueur d'onde*, T_k.

L'eau, sous forme gazeuse ou liquide, et les aérosols sont les sources les plus importantes du trouble atmosphérique. Du fait de leurs contributions différentes dans

les parties visible et infrarouge du spectre — la vapeur d'eau n'a aucune influence dans le visible —, il est intéressant de séparer leurs effets. Cette séparation se fait en général au moyen d'un filtre RG2, dont la coupure inférieure se situe à 0,63 μ et la coupure supérieure à 2,8 μ. Soit I_R le rayonnement mesuré avec ce filtre. Connaissant I, I_R et le coefficient de transmission du filtre, δ, on peut alors déterminer le rayonnement de courte longueur d'onde I_k ($\lambda < 0{,}63\ \mu$), défini par la relation :

$$I_k = I - 1/\delta . I_R \tag{15}$$

I_k n'étant pas affecté par la vapeur d'eau, on peut écrire, en supposant négligeable l'effet des autres gaz :

$$I_k = \frac{1}{S} \int_0^{0,63\,\mu} I_0(\lambda) . e^{-[a_R(\lambda)+a_D(\lambda)]\, m_r}\, d\lambda \tag{16}$$

ou encore

$$I_k = \frac{1}{S} . I_{0,k} e^{-\overline{a_k} \cdot m_r} \tag{17}$$

$I_{0,k}$ étant le rayonnement extra-terrestre pour $\lambda < 0{,}63\ \mu$.

On peut alors définir T_k, facteur de trouble de courte longueur d'onde par :

$$T_k = \frac{\overline{a_k}}{\overline{a_{R,k}}} \tag{18}$$

ou encore

$$T_k = P(m) . \log \left(\frac{I_{0,k}}{I_k} . \frac{1}{S} \right) \tag{19}$$

II.23. — *Coefficient de trouble d'Angström*, β.

Lorsque les particules sont sphériques, de rayon r, et que leur distribution en dimension suit une loi du type :

$$dn = C . r^{(-\alpha+3)}\, dr \tag{20}$$

C et α étant des constantes caractéristiques du spectre de distribution des particules et dn étant le nombre de particules par unité de volume dont le rayon est compris entre r et r + dr, on peut démontrer (Junge, 1958) que le coefficient d'extinction dû aux aérosols, $a_D(\lambda)$, suit une loi en puissance du type

$$a_D(\lambda) = \beta . \lambda^{-\alpha} \tag{21}$$

α variant entre 0 et 4 suivant les dimensions des aérosols.

Angström, à partir de résultats expérimentaux, propose pour α la valeur 1,3, qui représente assez bien la valeur moyenne de α dans la gamme de courte longueur d'onde. Il définit alors le rayonnement incident de courte longueur d'onde, I_k, par la relation

$$I_k = \frac{1}{S} \int_0^{0,63\,\mu} I_0(\lambda)\ e^{-[a_R(\lambda)+\beta \cdot \lambda^{-1,3}]\, m_r}\, d\lambda \tag{22}$$

β est appelé communément coefficient de trouble d'Angström.

Ainsi que T_k, il se détermine à partir des mesures de I et de I_R (filtre RG2), I_k se déduisant par la relation (15). Perrin de Brichambault (1963) suggère d'appliquer une correction pour tenir compte du rayonnement de longueur d'onde supérieure à 2,8 μ, dont la contribution est de l'ordre de 1 p. 100.

Des tables ou des abaques $I_k = f(m_r, \beta)$ permettent alors de calculer β par interpolation, connaissant I_k et m_r (Robinson). β varie en général entre 0,020 (ciel extrêmement pur) à 0,300 (ciel d'un bleu laiteux).

II.24. *Coefficient de trouble de Schuepp, B.*

L'hypothèse $\alpha = 1{,}3$ permet d'obtenir d'une manière relativement simple des valeurs comparables dans le temps et dans l'espace. C'est pourquoi le coefficient de trouble d'Angström β, basé sur une conception physique correcte du phénomène, est l'un des paramètres les plus utilisés à l'heure actuelle pour caractériser quantitativement le trouble atmosphérique.

La détermination expérimentale de la valeur réelle de α, comprise en général entre 0,5 et 2, permettrait cependant d'obtenir des valeurs de β plus proches de la réalité et d'apporter un supplément d'informations sur la taille des particules en suspension. C'est pourquoi Schuepp (1949), suivi par d'autres auteurs (Karalis, 1976 ; W.M.O., 1974), a proposé une méthode de détermination expérimentale de α et de β en utilisant, outre les mesures de I et de I_k, les mesures obtenues avec les filtres OG1 (coupure inférieure située à 0,525 μ) et RG8 (coupure inférieure située à 0,695 μ). Il définit un coefficient de trouble B dans l'intervalle $\Delta\lambda$ à partir de la relation :

$$I_{\Delta\lambda} = I_{0,\Delta\lambda}\, 10^{-(\overline{\tau_R}+\overline{\tau}_{O_3}+B)\, m_r} \qquad (23)$$

avec

$\overline{\tau_R}$: coefficient moyen d'extinction de Rayleigh pour l'intervalle $\Delta\lambda$ (lié à $\overline{a_R}$ par la relation $\overline{\tau_R} = a_R . \log e$) ;

$\overline{\tau}_{O_3}$ = coefficient moyen d'extinction dû à l'ozone dans l'intervalle $\Delta\lambda$;

B peut être déterminé soit graphiquement (Schuepp, 1949), soit numériquement (WMO, 1974). On peut le relier au coefficient d'Angström par la relation :

$$B = \beta . \bar{\lambda}^{-\alpha} . \log e \qquad (24)$$

$\bar{\lambda}$ étant la longueur d'onde effective de l'intervalle où on détermine B.

Dans ce qui suit, nous nous sommes intéressés principalement aux paramètres T, facteur de trouble total de Linke, et β, coefficient de trouble d'Angström. Nous présentons les résultats concernant les six premier mois pendant lesquels les mesures ont été faites en continu sur le site d'Avignon-Montfavet, après une première période d'essai nécessaire à la mise au point des appareillages de mesure.

III. — Dispositif expérimental

III.1. — *Mesure du rayonnement direct*

La mesure du rayonnement direct est effectuée au moyen de pyrhéliomètres Eppley, type Normal Incidence Pyrheliometer (Cliché 1). L'élément sensible est une surface noire dont l'élévation de température est mesurée au moyen d'une thermo-

pile située à la base d'un tube cylindrique qui limite l'angle de visée à environ 5° du ciel circumsolaire. L'intérieur de ce cylindre est noirci et rempli d'air sec à la pression normale. Une fenêtre de quartz de 1 mm d'épaisseur est interposée à l'entrée du tube. Les filtres qui permettent de séparer le rayonnement dans différents domaines spectraux sont montés sur un disque rotatif et viennent se positionner devant la fenêtre de quartz.

Cliché 1. — *Pyrhéliomètres Eppley, type Normal Incidence Pyrheliometer.*

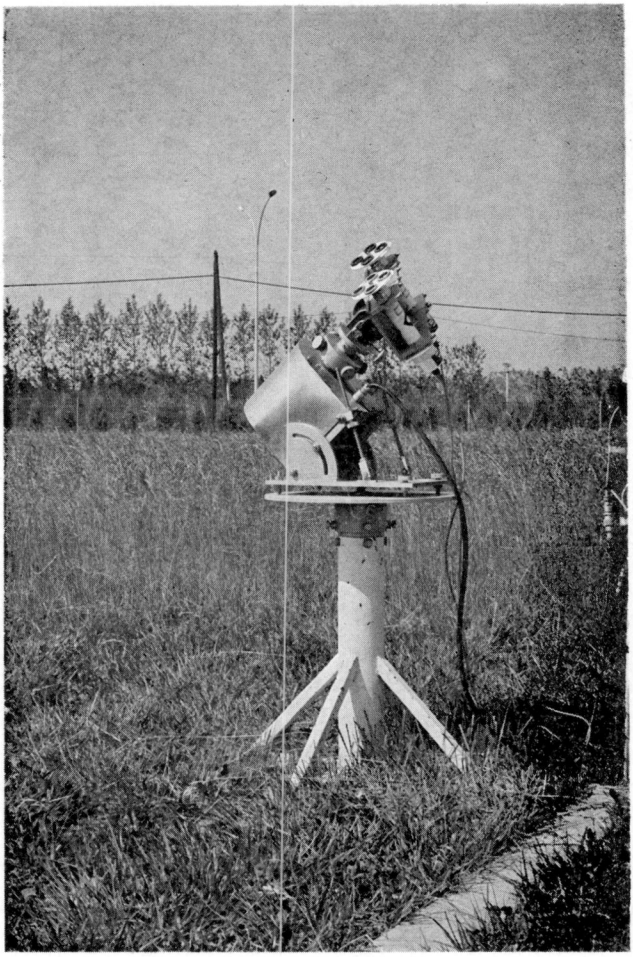
De manière à ce que l'élément sensible soit toujours perpendiculaire aux rayons, les pyrhéliomètres sont montés sur une monture équatoriale dont l'axe de rotation, parallèle à celui de la terre, est animé d'un mouvement de rotation d'un tour en 24 h (cliché 2). L'axe de la monture est réajusté deux à trois fois par semaine pour tenir compte de la variation de la déclinaison du soleil.

Durant les mesures, deux pyrhéliomètres Eppley ont été utilisés, l'un sans filtre pour mesurer l'intensité totale du rayonnement solaire direct, I, l'autre avec un filtre RG2 afin d'obtenir le rayonnement de courte longueur d'onde I_k. Ces valeurs ont été calculées à partir des coefficients d'étalonnage fournis par le constructeur.

III.2. — *Filtres*

Les filtres RG2 utilisés pour les mesures sont des filtres Schott dont la coupure inférieure se situe à 0,63 μ et la coupure supérieure à 2,8 μ. La vérification de ces valeurs a été effectuée au moyen d'un spectrophototomètre Beckman. On constate effectivement que les coupures se situent à 0,63 μ et 2,8 μ.

Le coefficient de transmission du filtre, δ, qui dépend de l'épaisseur du filtre et de sa température (Angström et Drummond, 1960) est donné par le constructeur égal à 0,91. A la précision près du spectrophotomètre Beckman, c'est la valeur moyenne trouvée pour les différents filtres RG2 testés.



Cliché 2. — *Monture équatoriale pour pyrhéliomètre.*

III.3. — *Acquisition et traitement des données*

Les tensions délivrées par les pyrhéliomètres et les autres appareils de mesures de rayonnement (global et diffus) sont envoyées sur une chaine d'acquisition de données Vidar-Pdp 8 et moyennées sur une heure. Ces données moyennes horaires sont ensuite mises sur cartes perforées et traitées sur ordinateur au moyen d'un programme qui permet, entre autres, de calculer les valeurs moyennes des paramètres T et β (Baille, Mermier et Reich, 1976).

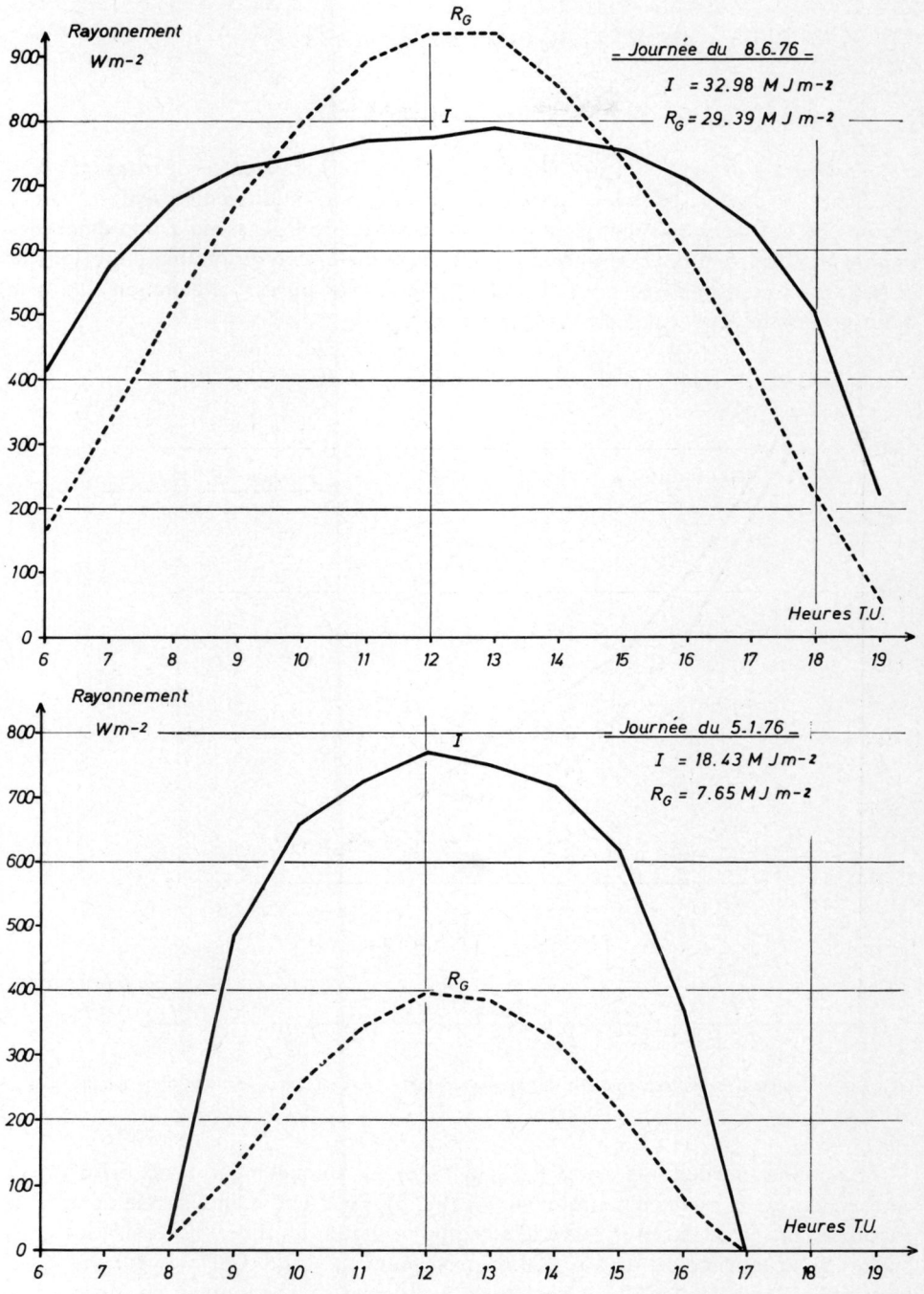


FIG. 2. — *Exemples d'évolution journalière du rayonnement direct* I *et du rayonnement* R_G *pour une journée d'été et une journée d'hiver.*

IV. — Résultats expérimentaux

IV.1. — *Rayonnement direct solaire, I*

La figure 2 présente le rayonnement direct solaire I pour deux journées très claires, l'une en janvier, l'autre en juin. On constate qu'au midi solaire vrai, la valeur absolue de I est pratiquement identique pour ces deux journées, malgré la différence importante du trajet optique parcouru, qui varie du simple au double entre janvier et juin. Ceci confirme que pour des atmosphères très pures l'atténuation due à la diffusion par les molécules d'air est très faible.

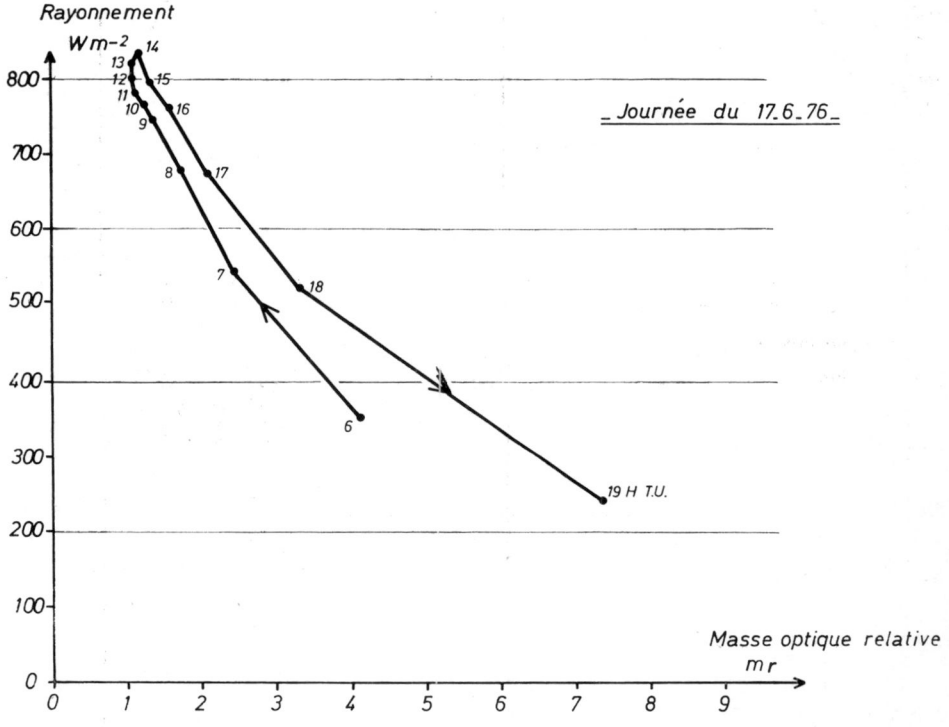


FIG. 3. — *Exemple d'évolution journalière du rayonnement direct en fonction de la masse d'air optique relative*

Pour une journée très claire (17 juin 1976), le rayonnement direct est présenté en fonction de la masse d'air relative, m_r (fig. 3). Pour une même masse optique, le rayonnement direct est plus élevé le soir que le matin. La différence entre les deux parties de la journée est de 5 p. 100 environ pour $m_r = 2{,}5$. Certains auteurs (Thomas et Thekaekara, 1976) ont également remarqué ce phénomène de façon quasi systématique. L'hypothèse avancée comme explication serait que l'évaporation progressive de l'eau en phase liquide autour des particules contenue dans la couche près du sol diminuerait les dimensions de ces particules, causant ainsi une diffusion moins

importante. Ceci expliquerait la plus grande transparence de l'atmosphère l'après-midi, bien que les épaisseurs équivalentes d'ozone et de vapeur d'eau soient à peu près identiques matin comme après-midi.

IV.2. — *Les paramètres du trouble*

Les paramètres de trouble T et β sont calculés à partir des moyennes horaires du rayonnement direct et de m_r, alors qu'ils sont en général calculés à partir de mesures ponctuelles faites lorsque le ciel est dégagé en direction du soleil. Il en résulte que, pour les périodes de ciel clair avec quelques passages nuageux, les valeurs des coefficients de trouble obtenus à partir des moyennes sont légèrement plus élevées que celles qui seraient obtenues par la moyenne des coefficients calculés à partir des mesures ponctuelles.

IV.21. *Evolution journalière.*

Les figures 4 et 5 présentent deux exemples d'évolution journalière de T et de β, ainsi que du rapport rayonnement diffus sur rayonnement global D/R_G. On constate que ces trois paramètres ont une évolution similaire au cours de la journée.

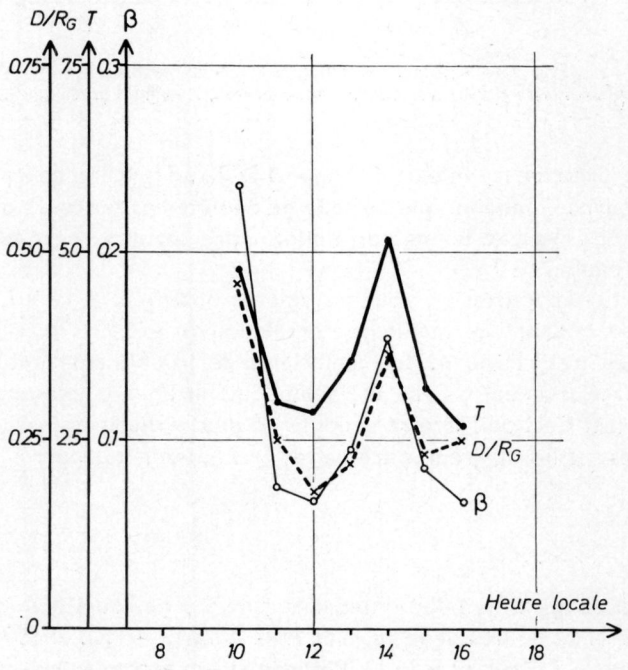


FIG. 4. — *Exemple d'évolution journalière de T, β et du rapport D/R_G (journée avec variations importantes du trouble atmosphérique).*

_ Journée du 4.1.76 _

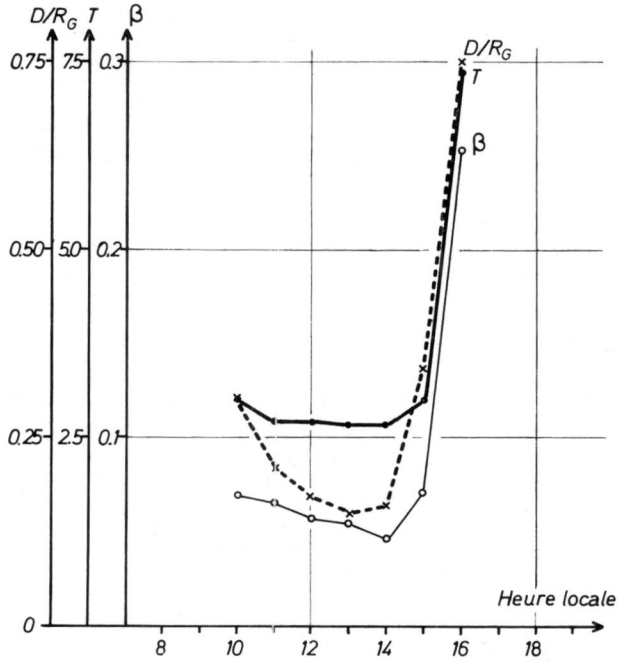


FIG. 5. — *Exemple d'évolution de* T, β *et du rapport* D/R_G *(journée très claire, avec augmentation du trouble en fin d'après-midi).*

La figure 6 présente les valeurs du rapport D/R_G en fonction de β pour différentes heures de la journée, pendant une période de beau temps au cours du mois de janvier 1976. On observe une bonne corrélation entre ces deux paramètres (r, coefficient de corrélation = 0.92).

Si on effectue la régression pour les valeurs observées à 12 H T.U. pendant ce même mois, on obtient une meilleure corrélation ($r \simeq 0.97$).

Par journée très claire, où les coefficients de trouble sont faibles ($\beta \simeq 0.070$, $T \simeq 2.5$), la corrélation entre D/R_G et β semble moins bonne, notamment en début et en fin de journée. Ceci doit être sans doute dû aux erreurs de mesure plus importantes commises sur les différents paramètres D, R_G, I et I_k au lever et au coucher du soleil.

IV.22. *Evolution mensuelle.*

L'évolution du coefficient de trouble d'Angström β au cours du premier semestre 1976 pour différentes heures de la journée (9 H T.U., 12 H T.U. et 15 H T.U.) est présentée sur la figure 7. Pour 12 H T.U., il est également présenté l'évolution du rapport D/R_G. Le seuil au dessus duquel il faut éliminer les mesures est assez subjectif. Nous avons fixé arbitrairement la limite $\beta = 0.300$, qui nous semble être une valeur

$D/R_G = 2.252\,\beta + 0.022 \qquad r = 0.919$

relation $D/R_G = f(\beta)$

du 5.1.76 au 12.1.76

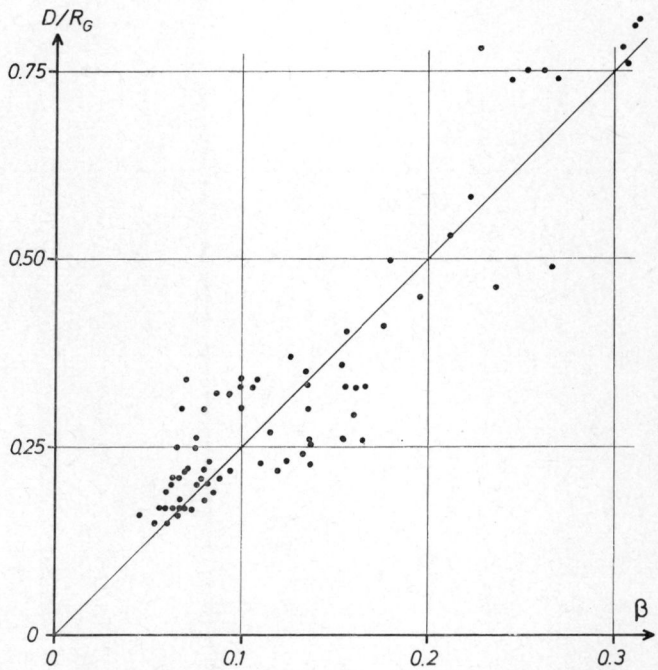


FIG. 6. — *Corrélation entre* β *et* D/R_G *pour la période du* 5 *janvier au* 12 *janvier* 1976.

limite pour β dans notre cas. Au-dessus de ce seuil, la nébulosité est alors trop importante pour que la valeur moyenne horaire de β calculée puisse être considérée comme vraiment représentative du trouble atmosphérique.

Comme constaté pour l'évolution journalière, le rapport D/R_G est très bien corrélé avec β. On observe cependant au cours du temps un décalage progressif qui se traduirait, au niveau de la régression linéaire $D/R_G = a + b.\beta$, par une variation de la pente b en fonction de la période de l'année.

Si on regarde l'évolution temporelle de β au cours de ces six premiers mois de 1976, on constate que le trouble est faible en janvier, augmente fortement en février pour revenir à des valeurs plus faibles en mars, avril et juin. Il est trop tôt pour dire si β suit une variation cyclique au cours de l'année ainsi que l'ont observé divers auteurs (Flowers *et al.* 1969 ; Peterson et Flowers, 1977). Il semblerait cependant que les variations de β traduisent les conditions synoptiques et mésoclimatiques régnant sur la région (arrivées d'air froid et sec en provenance du nord par périodes de mistral, masses d'air d'origine marine par vent de sud, etc...). Ceci peut s'expliquer par le fait que les mesures sont effectuées dans un site semi-rural encore peu industrialisé

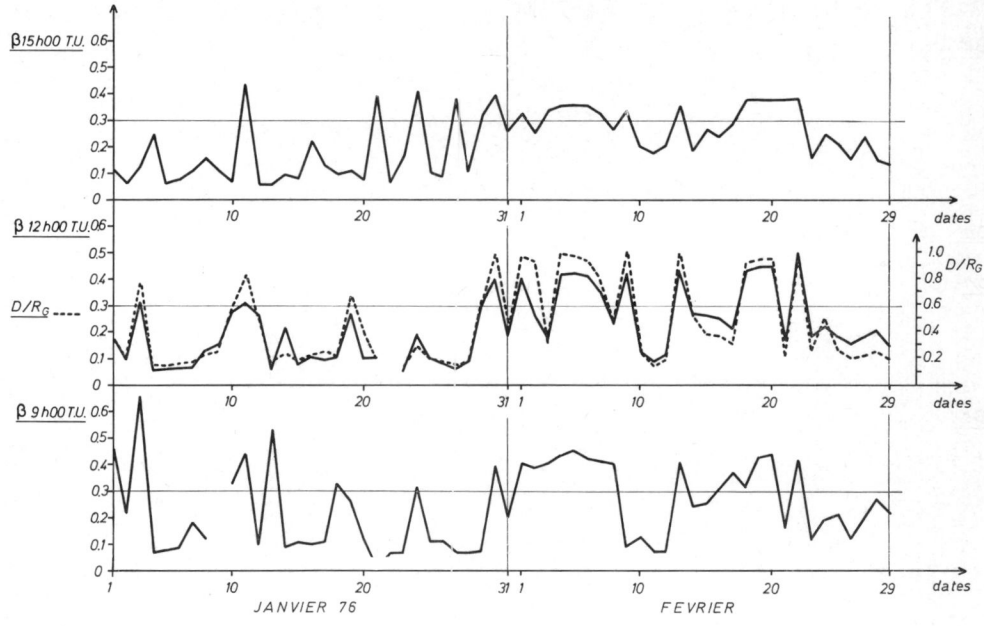

β 15h00 T.U.
β 12h00 T.U.
D/R_G
β 9h00 T.U.
dates
JANVIER 76
FEVRIER

FIG. 7.

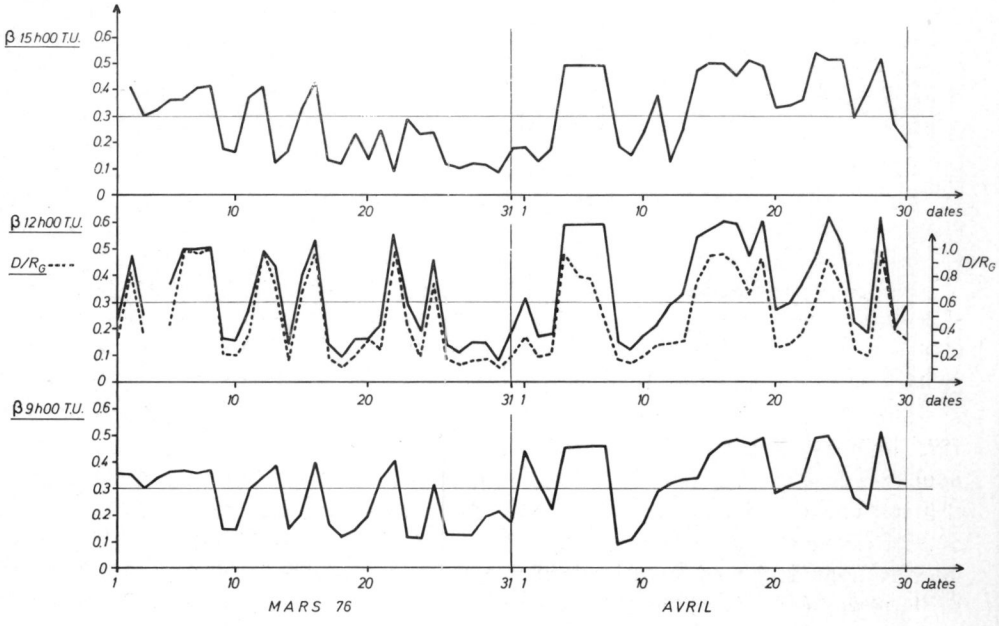

β 15h00 T.U.
β 12h00 T.U.
D/R_G
β 9h00 T.U.
dates
MARS 76
AVRIL

FIG. 7.

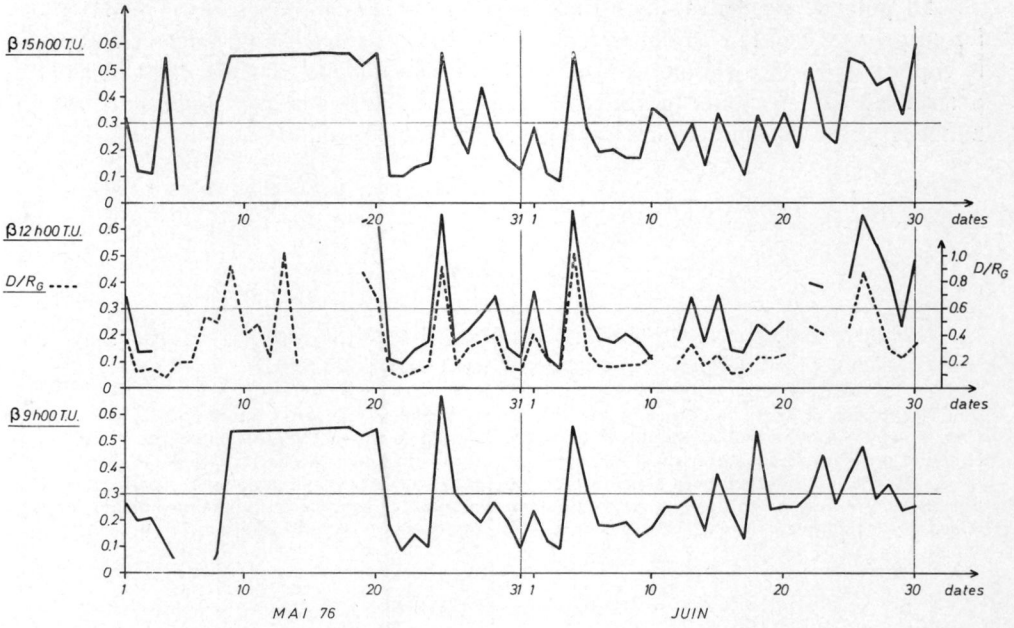


FIG. 7. — *Evolution du coefficient de trouble d'Angström, β, au cours du 1er semestre 1976 pour différentes heures de la journée.*

et que les variations du trouble sont dues essentiellement aux origines différentes des masses d'air arrivant sur le site, et relativement peu à la pollution atmosphérique.

De plus, une comparaison de l'évolution du rapport D/R_G des six premiers mois de 1975 et de 1976 montre que les variations sont assez différentes entre ces deux années. Il semblerait donc que les variations de β au cours du premier semestre 1976 soient particulières à cette période de mesures.

V. — Discussion des résultats

L'étude détaillée des résultats obtenus sur les six premiers mois de mesures en continu du rayonnement direct a donné d'ores et déjà un certain nombre d'enseignements. Du point de vue instrumental, l'ensemble de mesures monture équatoriale — pyrhéliomètre, exposé dans les conditions naturelles, a fonctionné de façon satisfaisante. Le problème technique le plus important réside pour l'instant dans la détermination précise des coefficients de transmission des différents filtres (RG2, RG8, OG1), précision nécessaire lorsqu'on désire calculer l'exposant α de la loi en puissance.

L'acquisition des données et leur traitement en temps réel permet de déterminer un coefficient moyen horaire qui traduit peut être plus fidèlement l'état général de l'atmosphère que des coefficients calculés à partir de mesures ponctuelles, lesquels sont plus sujets aux variations à court terme des niveaux de pollution des concentrations en aérosol et vapeur d'eau.

Du point de vue des résultats concernant le trouble atmosphérique, on peut signaler en premier lieu la corrélation très nette qui existe entre les paramètres T et β et le rapport D/R_G. Ce résultat, s'il est confirmé par la suite, est important puisqu'il permettrait de déterminer le trouble atmosphérique avec une précision relativement bonne à partir de mesures des rayonnements global et diffus.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Study of atmospheric turbidity in a semi-rural site (Montfavet). I. — Turbidity measurements during the first six months of 1976

This paper presents some results of atmospheric turbidity measurements in a semi-rural site (Montfavet) during the first six months of 1976. The first part deals with the definition and the significance of the various characteristical turbidity parameters. The second part concerns the discussion of the results, considering both short-term trend (daily variation) and long-term trend (monthly variation). We have noted a strong correlation between turbidity parameters (Linke turbidity factor T, Angström turbidity coefficient β) and the ratio D/R_G of diffuse on global radiation.

Zusammenfassung

Untersuchung der Atmosphärestörung in halb ländlichem Gebiet (Montfavet) I. — Entwicklung der Störung während des ersten semesters 1976

Dieser Artikel enthält die Ergebnisse bezüglich der Entwicklung der Atmosphärestörung in halb ländlicher Umgebung (Montfavet) während des ersten Semesters 1976. Nach kurzer Aufführung der Bedeutung verschiedener für die Atmosphärestörung charakteristischer Parameter werden die Ergebnisse dargelegt und besprochen. Dabei wird sowohl der kurzfristige (täglich) Verlauf als auch die langfristige (monatliche) Entwicklung berücksichtigt. Es konnte insbesondere festgestellt werden, dass eine starke Korrelation zwischen den Störungsparametern (Störungsfaktor Linke T, Angström Störungskoeffizient) besteht, und dass die diffuse Strahlung der globalen Strahlung D/R_G beizufügen ist.

РЕЗЮМЕ

Изучение атмосферических нарушений в полу-сельской эоне (Монфаве).
I. — Эволюция нарушений в течении первого полугодия 1976.

Бай А., Мермье Мария.

В данной работе представлены результаты эволюции атмосферических нарушений в течении первого полугодия 1976-го года, в полу-сельской зоне Монфаве.

Прежде всего напоминаются определения и значения различных параметров, характеризующих эти нарушения, и, в заключение, даются и обсуждаются результаты эволюции, с одной стороны-краткосрочной (ежедневной), и-с другой-долгосрочной (месячной). Необходимо отметить существование хорошей корреляции между параметрами нарушений (фактор нарушения Линке-Т, коеффициент нарушения Ангстре ма-β), и соотношением рассеянного и общего излучения-$Д/Я_G$.

Références bibliographiques

ANGSTRÖM A. K., DRUMMOND A. J., 1960. Transmission of cutoff glass filters employed in solar radiation research. *J. Opt. Soc. Amer.*, **50,** 974-979.

BAILLE A., MERMIER M., REICH P., 1976. *Mise au point d'un programme de dépouillement et d'exploitation de mesures de rayonnement (bilan radiatif, facteur de trouble, indice d'éclairement).* Note interne M/76/5. INRA Station de Bioclimatologie d'Avignon.

DYER A. J., 1974. The effect of volcanic eruptions on global turbidity and an attempt to detect long-term trends due to man. Quart. *J. Roy. Meteor. Soc.*, **100**, 563-571.

FLOWERS E.C., MC CORMICK R. A., KURFIS K. R., 1969. Atmospheric turbidity over the United States. *J. Appl. Meteo.*, **8,** 955-964.

JOSEPH J. H., MANES A., 1971. Secular and seasonal variations of atmospheric turbidity at Jerusalem. *J. Appl. Met.*, **10,** 453-461.

JUNGE C. E., 1958. Atmospheric chemistry and radioactivity. *Advances in Geophysics*, **4,** 1-108.

KARALIS J. D., 1976. The turbidity parameters in Athens. *Arch. Meteor. Geoph. Biokl.*, Ser. B, **24,** 25-34.

MC CREE K. J., KEENER M. E., 1974. Effect of atmospheric turbidity on the photosynthetic rates of leaves. *Agric. Meteor.*, **13,** 349-358.

MANI A., CHACKO D., IYER N. V., 1973. Atmospheric turbidity over India from solar radiation measurements. *Solar Energy*, **14,** 185-191.

PERRIN de BRICHAMBAULT C., 1963. *Rayonnements solaires et échanges radiatifs naturels.* Gauthiers-Villars Editeur, Paris.

PETERSON J. T., FLOWERS E. C., 1977. Interactions between air pollution and solar radiation. *Solar Energy*, **19,** 23-32.

ROBINSON N., 1966. *Solar radiation.* Elsevier Editeur, Amsterdam.

SCHUEPP W., 1949. Die bestimmung der komponenten der atmosphärischen trübung aus aktinometer messungen. *Arch. Meteor. Geoph. Biokl.*, Ser. B, 1, 257-346.

THEKAEKARA M. P., 1976. Solar radiation measurement : techniques and instrumentation. *Solar Energy*, **18,** 309-325.

THOMAS A. P., THEKAEKARA M. P., 1976. *Experimental and theoretical studies on solar energy for energy conversion.* Sharing the sun, 1, 338-355, K. W. Boer Editeur.

W.M.O., 1974. W.M.O. operations manual for sampling and analysis techniques for chemical constituents in air and precipitation. *W.M.O. Technical Note* n° 299.

Ann. agron., 1977, **77** (5), 561-566

Chronique des livres

MONTEITH J. L. — *Vegetation and the atmosphere. Vol.* 1. *Principles. Vol.* 2. *Case studies.* Academic Press Ed., London, 278 p. + 439 p., 1975.

« Végétation et atmosphère » est un ouvrage fondamental qui traite des concepts de base et des mesures en micrométéorologie des communautés végétales.

Des micrométéorologistes et des écologistes de neuf pays ont été appelés à rédiger les différents chapitres et ont ainsi réalisé de précieuses mises au point bibliographique sur les connaissances actuelles de l'interaction milieu physique et domaine biologique.

L'ouvrage a été scindé en deux parties. La première partie traite des principes de base de la micrométéorologie, de la mise en équation des phénomènes physiques en relation avec les processus physiologiques, et des schémas conceptuels illustrés de quelques exemples chiffrés ; chaque chapitre d'une quarantaine de pages, rappelle, d'une façon condensée, les bases essentielles et renvoie à une bibliographie spécialisée et sélectionnée. La seconde partie, très originale, illustre ces principes par des études de cas particuliers, regroupées par type de végétation, les principales cultures, les forêts, ou par type d'écosystèmes divers ; pour la plupart de ces groupes végétaux, sont regroupées des données bibliographiques sur le bilan radiatif, les échanges aérodynamiques, les bilans énergétique et hydrique, les échanges photosynthétiques, la transpiration, la production de matière sèche, sous forme de nombreux tableaux, schémas et profils d'évolution.

Plan de l'ouvrage :

Vol. 1 : « Principes »

Elston J., Monteith J. L. — Micrométéorologie et écologie.
Ross J. — Transfert radiatif dans les communautés végétales.
Thom A. S. — Echanges de quantité de mouvement, de masse et d'énergie dans les communautés végétales.
Rutter A. J. — Cycle hydrologique dans la végétation.
Chamberlain A. C. — Mouvement des particules atmosphériques au sein des communautés végétales.
Waggoner P. E. — Modèles micrométéorologiques.
Szeicz G. — Instruments et leur mise en place.
Index Matière.

Vol. 2 : « Etudes de cas ».

Denmead O. T. — Céréales des pays tempérés.
Uchijima Z. — Maïs et riz.
Brown K. W. — Betterave à sucre et pomme de terre.
Saugier B. — Tournesol.
Stanhill G. — Coton.
Rose C. W., Begg J. E., Torsell B. W. R. — Luzerne Townsville (modèle de croissance).
Jarvis P. G., James G. B., Landsberg J. J. — Forêts de conifères.
Rauner Yu L. — Forêt feuillue.
Allen L. H. Jr, Lemon E. R. — Forêt tropicale humide (modèle de simulation SPAM).
Kalma J. D., Fuchs M. — Vergers d'agrumes (phénologie et gel inclus).
Linacre E. — Marécages.
Ripley E. A., Redmann R. E. — Prairies.
Lewis M. C., Callaghan T. V. — Toundra.
Index Matière.

L'ouvrage s'adresse aux spécialistes micrométéorologistes et écologistes de la recherche agronomique ou forestière, mais aussi aux hydrologistes préoccupés de bilan hydrique de bassin versant et d'évaporation, et aux météorologistes concernés par les conditions et les phénomènes de surface.

De niveau élevé, il est recommandé à tout chercheur ou enseignant supérieur, et il servira de base de références à bien des unités de documentation.

C'est un ouvrage également agréable de manipulation et de bonne présentation. Son prix hélas élevé, peut en restreindre la large diffusion souhaitable.

L'éditeur et les auteurs sont à remercier pour leurs travaux et leur louable contribution au progrès et à la diffusion des connaissances en micrométéorologie.

L. D.

POGGI A. — *Introduction à la micrométéorologie. Transferts d'énergie atmosphère-sol.* Masson Ed., Paris, 168 p., 1977.

La micrométéorologie, science des phénomènes de surface, est susceptible d'applications directes dans des domaines variés : agriculture, pollution, aménagement et bien d'autres.

Deux facteurs essentiels contrôlent l'environnement et toute l'écologie : les échanges d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et le sol. Les transferts turbulents ont un rôle important dans l'évolution de ces processus et le présent ouvrage initie aux mécanismes de la turbulence dans la couche limite planétaire.

Le texte s'adresse aux enseignants et aux étudiants en météorologie de l'enseignement supérieur. Aucun ouvrage similaire en langue française n'avait été publié et celui-ci constituera une base essentielle pour l'initiation aux études et recherches en turbulence atmosphérique au voisinage du sol.

Plan de l'ouvrage :

Préface, Bibliographie des ouvrages à consulter, Avant-propos, Introduction.
1. Modélisation de l'atmosphère (équation d'état, transformation adiabatique, équilibre et stabilité...).
2. Généralités sur la turbulence (équation du mouvement, équation de l'énergie, conservation...).
3. Conditions d'apparition de la turbulence au voisinage d'une paroi. Influence de la stratification de l'air (nombre de Reynolds et rugosité).
4. Transferts turbulents (parcours de mélange, loi logarithmique, théorie de Prandt 1, de Taylor, de Monin et Obukhov).
5. Etude statistique de la turbulence (échelles, spectre, théorie de Kolmogorov, modèle de Prandt 1).
6. La couche limite dans un contexte naturel.
7. Phénomènes radiatifs.
8. Bilan thermique à la surface du sol.

Appendice, Bibliographie, Index matière.

Les six premiers chapitres font l'essentiel du propos ; on peut regretter que les deux derniers chapitres soient traités aussi brièvement et que le bilan d'énergie ne soit illustré que par l'exemple de glaciers.

Il s'agit là d'un manuel d'enseignement, de présentation modeste mais fort pratique ; le souci de clarté pédagogique est remarquablement rempli. Chercheurs, enseignants et étudiants en micrométéorologie auront à cœur de conserver sous la main un livre de base aussi essentiel.

L. D.

LIETH H., WHITTAKER R. H. *Primary Productivity of the Biosphere.* Ecological studies, Vol. 14, JACOBS J. *et al.* Ed., Springer Verlag, Berlin, 339 p., 1975.

Les origines du présent ouvrage remontent au second Congrès de Biologie, organisé par American Institute of Biological Sciences, qui eut lieu à Miami (Floride), en octobre 1971. Les communications ont été remaniées, certains chapitres ont été ajoutés. Une partie de l'ouvrage a été financée par le programme américain PBI sur les forêts feuillues. Le milieu forestier représente en masse, la majeure partie de la biomasse photosynthétisée, et l'ouvrage s'appuie souvent sur des exemples issus de ce milieu.

D'une façon générale, il s'agit là d'une synthèse bibliographique des connaissances actuelles sur la productivité primaire mondiale, réalisée en termes de :

— méthodologie de mesure ou d'estimation de la biomasse ;
— études de modèles de fonctionnement et des facteurs déterminants, climatiques, hydriques ou nutritionnels ;
— évaluation chiffrée ou cartographiée des valeurs locales, régionales ou mondiale de la biomasse pour certaines classes d'écosystèmes terrestres ou aquatiques ;
— conséquences pour la vie de l'homme.

Plan de l'ouvrage :

Partie I : Introduction.
1. Objectifs de l'ouvrage.
2. Historique de la recherche en productivité primaire.

Partie II : Méthodes de mesure de la productivité.

3. Hall A.S.C., Moll R. — Méthodes d'estimation de la productivité primaire aquatique.
4. Whittaker R. H., Marks P. L. — Méthodes d'estimation de la productivité terrestre.
5. Lieth H. — Mesure de la valeur calorique.
6. Sharp D. D., Lieth L., Whigham D. — Estimation de la productivité régionale en Caroline du Nord.
7. Sharpe D. M. — Méthodes d'estimation de la productivité primaire régionale.

Partie III : Modèles de productivité globale.

8. Bunt J. S. — Productivité primaire des écosystèmes marins.
9. Likens G. E. — Productivité primaire des écosystèmes aquatiques terrestres.
10. Lieth H. — Productivité primaire des principaux systèmes végétaux du monde.
11. Murphy P. G. — Productivité primaire nette des écosystèmes terrestres tropicaux.

Partie IV : Utilisation des connaissances en productivité primaire.

12. Lieth H. — Modélisation de la productivité primaire du monde.
13. Box E. — Evaluation quantitative des modèles de productivité primaire globale à l'aide de calculateurs.
14. Lieth H. — Perspectives liées aux mesures de productivité.
15. Whittaker R. H., Likens G. E. — La biosphère et l'homme.

Une bibliographie est annexée à chaque chapitre. Un index matière clôt l'ouvrage.

La première partie expose les buts de l'ouvrage et retrace brièvement l'historique des travaux sur la productivité primaire, depuis Aristote... jusqu'au récent Programme Biologique International.

La seconde partie traite de manière détaillée des méthodologies suivantes :

— en milieu aquatique : échanges gazeux, marquage au carbone 14, corrélation avec la teneur en chlorophylle et l'éclairement,

— en milieu terrestre : échanges gazeux, prélèvement d'échantillons, analyse des structures des couverts végétaux forestiers, corrélation avec les surfaces foliaires, ou la teneur en chlorophylle, avec l'appui des méthodes statistiques ou l'utilisation de modèles analytiques.

Suivent :

— un chapitre sur la mesure de la valeur calorique de la matière sèche, et de certains composés chimiques et biochimiques ;

— un chapitre basé sur l'exemple particulier de la Caroline du Nord, concernant l'estimation régionale à partir des données statistiques agricoles et forestières et conduisant à une cartographie régionale ;

— un chapitre de généralités sur les méthodologies régionales qui expose l'utilisation des facteurs de conversion ramenant les données de rendement à celles de productivité primaire nette, et sur les essais de modélisation en fonction du climat soit essentiellement l'évapotranspiration ou le bilan hydrique.

La troisième partie traite d'aspects plus globaux, de type fonctionnel, méthodologique et donne des valeurs estimées de production pour :

— les écosystèmes marins et les écosystèmes d'eau douce, tous deux peu productifs en quantité globale bien que d'excellent rendement photosynthétique ;

— les écosystèmes terrestres qui sont les plus importants pour l'alimentation et l'environnement de l'homme ;

— le milieu tropical où les données plus rares et plus dispersées que pour les autres milieux ont fait l'objet d'un chapitre séparé.

La quatrième partie relate l'utilisation des données de production sur quelques exemples choisis :

— application à la modélisation et au calcul du schéma de productivité mondiale (les divers modèles de Lieth sont exposés). Les différentes étapes de ces modèles sont basées, successivement, sur l'établissement de corrélation entre la productivité et les paramètres de l'environnement ; puis une seconde étape utilisant la réinsertion de ces valeurs locales dans le modèle global de production, conduisant à la réalisation de cartographies de production ; à partir de cette cartographie, l'intégration de toutes les valeurs conduit alors à une quantification des productions totalisées par aire géographique et à un bilan mondial ;

— l'accroissement de production des écosystèmes peut être abordé sous quatre aspects : productivité par strate, compétition pour la production des espèces en présence, et influence de la richesse floristique, variabilité de composition chimique des écosystèmes selon les niveaux trophiques ;

— le dernier chapitre, « l'homme et la biosphère », reprend les données globales de production par type d'écosystème, et sa sommation comme caractérisation de la biosphère, les données utiles

à l'alimentation et les influences de l'homme sur la biosphère, en fonction notamment de la surexploitation de la production et de la pollution.

L'ouvrage, de présentation soignée, est très riche en données, sous forme de tableaux, de cartographies, de références. Il représente une riche source d'informations et un effort de synthèse très réel. Hautement spécialisé, il intéressera les écologistes, les botanistes, les biologistes de la recherche et de l'enseignement supérieur. Son intérêt pour un plus large public sensibilisé aux problèmes écologiques de l'homme et de son environnement est également plus marginal mais certain.

L. D.

DOWNS R. J., HELLMERS H. — *Environment and the experimental control of plant growth*. Academic Press, London, 145 p., 1975.

Le but de cette monographie est la description des avantages et des problèmes pratiques de culture et de croissance des plantes, en milieu contrôlé, tel que serres, chambres de croissance, phytotrons et autres chambres que l'on peut construire en prototype ou acheter dans le commerce.

Plan de l'ouvrage :

1. Introduction.
2. Température.
3. Lumière.
4. Gaz carbonique.
5. Eau.
6. Environnement.
7. Enceintes contrôlées pour la recherche.

Appendice et index matière ; Bibliographie par chapitre.

L'ouvrage reprend les définitions et notions de base des différents facteurs, cite et compare les techniques et les méthodologies à mettre en œuvre, les résultats obtenus du point de vue variabilité climatique et des réactions biologiques dans les expériences citées.

Il intéressera les biologistes niveau recherche et enseignement.

L. D.

FUKUI E., ed. — *The climate of Japan. Developments in Atmospheric Science*, 8, Kodansha Ltd (Tokyo) et Elsevier Scientific Publ. C° (Amsterdam), 317 p., 1977.

Le climat est un élément important de l'environnement physique exerçant une influence considérable sur les activités humaines et les conditions de vie. L'éloignement du Japon des autres continents a conduit à limiter les connaissances et les informations sur le climat de ce pays. Aucune monographie sur le climat du Japon n'a été publiée en anglais, depuis les années 1930. Cette lacune est maintenant comblée.

Le livre, rédigé par une équipe de spécialistes japonais, relate les données acquises grâce aux progrès rapides réalisés en météorologie et en agrométéorologie au Japon ces dernières décennies.

Plan de l'ouvrage :

1. Introduction.
2. Les saisons au Japon.
3. Aspects dynamique et synoptique du climat japonais.
4. La mousson d'hiver.
5. Bai-u, la saison des pluies de début d'été.
6. La courte saison sèche de la mi-été.
7. Typhons et pluies d'automne (shûrin).
8. Bilan thermique.
9. Bilan hydrique.
10. Lignes de flux et vents.
11. Modifications du climat par les activités humaines.
12. Division climatique et climatographie.
13. Fluctuations climatiques, passées et présentes.

Index auteur ; Index géographique ; Index matières.

L'ouvrage est de présentation agréable, illustré d'exemples et facile de consultation.

L'ouvrage est d'une portée générale. Il intéressera non seulement les spécialistes de ce pays mais aussi tous ceux qui se sentent concernés par les problèmes que pose la réalisation d'une monographie climatique régionale.

L. D.

PAGNEY P. — *Les climats de la terre. Initiation aux études de géographie.* Masson, Paris, 151 p., 1976.

Le souci de l'auteur est de réaliser une synthèse logique et explicative de la réalité des climats régionaux qu'il présente comme une mosaïque complexe où s'emboitent les particularités régionales structurées par le jeu des facteurs zonaux et azonaux.

Introduction.

1. Les fondements de l'étude régionale des climats.
2. La climatologie régionale aux hautes latitudes.
3. La climatologie régionale aux latitudes tempérées.
4. La climatologie régionale aux basses latitudes.
5. Les manifestations de l'azonalité à la surface du globe et leurs combinaisons avec les tendances zonales.
6. Les échelles fines de la mosaïque climatique du globe. Climats locaux et microclimats.
7. La mosaïque climatique du globe et les variations climatiques.

Tableaux ; Bibliographie ; Table des figures ; Table des planches ; Index géographique ; Index auteurs.

L'ouvrage est de présentation correcte. Il est illustré de nombreux schémas et les exemples cités sont clairement commentés.

Publié dans une collection d'initiation, l'ouvrage court, facile à lire, devrait convenir aussi bien à un public large, non averti, soucieux de s'initier aux mécanismes du climat régional, qu'à un public de lecteurs spécialistes, qui apprécieront son niveau introductif convenant à une bibliothèque de base en climatologie.

L. D.

Ann. agron., 1977, **27** (5).

Contents

SEMINAR on " The applications to neutronic measures in agronomy and hydrogeology " (Cadarache, 16-18 novembre 1976)

Opening adresses : 1. — P. GUÉRIN de MONTGAREUIL 463
2. — M. HALLAIRE 467
3. — J. MARCESSE 469

List of Communications 476

Synthetical papers :

Ph. COUCHAT. — Methodological and technological bearings of soil moisture neutron meters 477

R. GUENNELON, B. CABIBEL. — Diverse applications of the neutron method of humidity measuring for the control and utilization of the hydrous reserves of the soils 489

F. A. DAUDET, G. VACHAUD. — Neutronic measure of the water stock in Soil. Applications to determination of water balance 503

G. GOSSE, A. PERRIER, B. ITIER. — Study of the actual evapotranspiration of a wheat field in the Parisian region 521

A. BAILLE, Marie MERMIER. — Study of atmospheric turbidity in a semi-rural site (Montfavet). I. — Turbidity measurements during the first six months of 1976 543

Books review 561

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 3-1978

Dépôt légal : 1er trimestre 1978. N° d'impression : 25013
CPPAP 26 017

annales agronomiques

Bimestriel

1977

Vol. 28. N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1977, **28** (6), 567-582.

Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant

I. — Etablissement des lois et vérifications expérimentales

R. BONHOMME et C. VARLET-GRANCHER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Les lois de Kubelka et Munk de propagation de la lumière dans les milieux diffusants ont été appliquées aux cultures. Elles permettent de calculer de façon analytique les énergies descendantes ou ascendantes dans un couvert végétal, à un niveau caractérisé par l'indice foliaire qui le surplombe, connaissant :

— les rayonnements solaires directs et diffus sur un plan horizontal au-dessus de la culture,
— la hauteur du soleil,
— l'inclinaison moyenne des feuilles,
— le coefficient de réflexion des feuilles (supposé identique au coefficient de transmission),
— le coefficient de réflexion du sol sous la culture,
— l'indice foliaire total de la culture.

Bien que leur établissement implique un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, les vérifications expérimentales obtenues sur une culture de Maïs sont en bon accord avec les valeurs calculées, aussi bien pour les profils de rayonnement diffus descendant et ascendant que pour les variations de l'albédo avec l'indice foliaire ou la hauteur du soleil.

I. — Introduction

Le rayonnement solaire est la source d'énergie qui permet la photosynthèse et l'évapotranspiration d'un couvert végétal ; il est aussi un des termes importants qui déterminent les conditions microclimatiques à l'intérieur d'une culture. Ces divers phénomènes dépendent de l'intensité du rayonnement solaire mais aussi de sa répartition dans la végétation.

Afin d'étudier la pénétration de la lumière dans une culture, de nombreux auteurs ont utilisé des modèles basés sur des relations mathématiques. Les approches les plus connues, et qui ont servi de départ à ces nombreux travaux, sont celles de Monsi et Saeki (1953) et de de Wit (1965) qui, à l'aide de modèles de pénétration du

rayonnement solaire et des courbes de photosynthèse des feuilles en fonction de l'éclairement, ont étudié l'assimilation théorique de l'ensemble du couvert végétal.

Dans une culture, l'énergie solaire reçue à un niveau est composée de trois termes :

— le rayonnement solaire direct à l'emplacement des taches de soleil,

— le rayonnement diffusé par le ciel et qui pénètre par tous les trous de la voûte végétale,

— les rayonnements transmis ou réfléchis par les feuilles après interception de la lumière solaire directe ou diffuse ; dans des couverts végétaux un peu denses cette dernière énergie devient prépondérante.

Or une étude critique récente des différents modèles (Lemeur et Blad, 1974) fait apparaître que :

— de nombreux travaux traitent seulement de la pénétration du rayonnement solaire direct et négligent l'énergie diffusée par le ciel et les nuages,

— peu d'études prennent en compte la lumière diffusée par les feuilles après interception des rayons lumineux,

— les hypothèses nécessaires pour établir ces modèles sont souvent mal définies,

— les modèles les plus complets nécessitent des calculs sur ordinateur assez longs et, à cause de leur complexité, sont peu utilisables en pratique pour des travaux de physiologie ou d'écologie végétales.

Nous avons donc choisi de développer une méthode de calcul assez simple des échanges radiatifs dans un couvert végétal basée sur les lois de pénétration de la lumière en milieu diffusant. Ces lois ont été établies par Kubelka et Munk (1931), puis généralisées par Duntley (1942) et servent surtout en spectrophotométrie des substances diffusantes : peintures, pigments, papier, plastiques ... ; elles sont souvent notées lois K-M. Leur application aux couverts végétaux a été abordée par Allen et Richardson (1968), Allen *et al.* (1970), Alderfer (1973), mais en considérant la culture comme un milieu homogène ; ces approches font intervenir des coefficients théoriques sans réalité physique et sont donc de peu d'intérêt pour comprendre et calculer la pénétration de la lumière dans des cultures réelles. Les travaux récents de Suits (1972), Suits et Safir (1972), Bunnik et Verhoef (1974) et Verhoef et Bunnik (1975) reposent sur des équations de type K-M, mais sont essentiellement orientés vers l'étude de la réflectance des couverts végétaux et nécessitent des calculs sur ordinateur assez complexes.

Il nous a donc paru intéressant de reprendre des lois de K-M, séduisantes pour leur simplicité, en recherchant des solutions analytiques pour les profils des rayonnements transmis ou réfléchis et en explicitant les coefficients qu'elles font intervenir en fonction des variables couramment mesurées en recherche végétale : surfaces foliaires, inclinaison et propriétés optiques des feuilles, facteur de réflexion du sol, ...

II. — Etablissement des lois de rayonnement dans le couvert végétal

Pour établir les lois de pénétration de la lumière dans la culture, certaines hypothèses sont nécessaires, nous en avons fait six regroupées dans le tableau 1. La dis-

cussion de certaines de ces hypothèses a été abordée dans un travail antérieur (Bonhomme, 1976) ; on verra ici celle des nouvelles hypothèses.

TABLEAU 1

Enoncé des différentes hypothèses

Hypothèse 1. — L'azimut des feuilles a la même probabilité de prendre n'importe quelle valeur de 0 à 2π : il n'y a pas d'azimuts privilégiés.

Hypothèse 2. — La probabilité de présence d'une feuille en un point donné d'une couche ne dépend pas de la position de ce point, que ce dernier soit dans une tache de soleil ou dans une zone d'ombre ; il n'y a pas de superpositions privilégiées.

Hypothèse 3. — L'inclinaison i est la même pour toutes les feuilles.

Hypothèse 4. — La pénétration du rayonnement diffus du ciel D suit une loi de type $D = D_0 \exp(-K'(i).f)$; K' est donné au tableau 3.

Hypothèse 5. — Les rayonnements interceptés et rediffusés par les feuilles (T : descendant, A : ascendant) sont isotropes à chaque niveau à l'intérieur du couvert végétal.

Hypothèse 6. — Le facteur de réflexion R est égal au facteur de transmission τ des feuilles.

Nous ne considérerons dans ce chapitre que des rayonnements monochromatiques.

2.1. — *Pénétration du rayonnement solaire direct*

Sur un plan horizontal au-dessus de la culture l'éclairement énergétique dû au rayonnement solaire est

$$S_0 = I \sin h,$$

où : I est l'éclairement énergétique d'un plan perpendiculaire à la direction du soleil, h est la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.

Soit S le rayonnement solaire direct incident moyen à un niveau f dans la végétation ; ce niveau est repéré par l'indice foliaire cumulé f qui le surplombe (c'est-à-dire, la surface des feuilles au-dessus du point considéré, par unité de surface de sol). En traversant la couche élémentaire « d'épaisseur df » le rayonnement S subit une diminution qui est, selon une loi analogue à celle de Beer :

$$dS = -K(i, h).S.df$$

où K(i, h) est une fonction complexe de l'inclinaison des feuilles i et de la hauteur h du soleil. Dans le cas où les hypothèses H_1, H_2, H_3 sont vérifiées, la fonction K(i, h) a déjà été établie et calculée par divers auteurs dont Chartier (1966) :

$$K(i, h) = \cos i \qquad \text{si } i \leqslant h$$
$$K(i, h) = (2 \cos h.\sin i.\sin m - \cos i.\sin h\,(\pi - 2m))/(\pi.\sin h) \qquad \text{si } i > h \qquad (1)$$

avec $m = \arccos(-\operatorname{tg} h/\operatorname{tg} i)$.

Le tableau 2 donne les variations de K(i, h) pour différentes valeurs de i et de h.

TABLEAU 2

Valeurs de la fonction d'extinction du rayonnement solaire direct K = K(i, h) *pour différentes inclinaisons des feuilles* i *et hauteurs du soleil* h

i (deg)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
h (deg) 5	1,000	0,996	1,985	3,129	4,206	5,165	5,972	6,600	7,031	7,249
15	1,000	0,996	0,966	1,175	1,464	1,741	1,981	2,170	2,301	2,367
25	1,000	0,996	0,966	0,906	0,964	1,072	1,178	1,267	1,329	1,361
35	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,808	0,836	0,868	0,894	0,907
45	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,656	0,641	0,637	0,637
55	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,497	0,462	0,447
65	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,423	0,335	0,301
75	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,423	0,259	0,179
85	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,423	0,259	0,087

2.2. — *Pénétration du rayonnement solaire diffus*

Au-dessus de la culture l'éclairement énergétique fourni sur un plan horizontal par le rayonnement solaire diffusé par le ciel et les nuages est D_0. La luminance L de la voûte du ciel n'est pas constante en tous points et diverses lois de répartition ont été proposées (Varlet-Grancher, 1975). Compte tenu de l'objectif que nous nous sommes fixés, d'éviter des calculs complexes, nous avons choisi, par ciel clair ou couvert, une loi simple de variation de L : la loi de Moon et Spencer (1942) souvent appelée S. O. C. (Standard Overcast Sky) :

— $L_l = L_{90}\,(1 + 2 \sin l)/3$;
— L_l = Luminance du ciel pour une zone de hauteur l au-dessus de l'horizon ;
— L_{90} = Luminance du ciel au zénith.

L'énergie fournie sur un plan horizontal, au-dessus du couvert végétal, par une couronne de ciel dl de hauteur l est (Perrin de Brichambaut, 1963) :

$$dD_0 = L_l . 2\,\pi \sin l \cos l\, dl$$

et l'on a par définition :

$$D_0 = \int_{l=0}^{l=\pi/2} dD_0$$

$$D_0 = \frac{7\,\pi\, L_{90}}{9}.$$

La luminance du ciel au zénith peut donc être déduite d'une mesure du rayonnement diffus D_0.

Soit D_l l'énergie diffuse incidente selon la direction l à un niveau f dans la végétation. De façon analogue à la pénétration du rayonnement solaire direct, on a dans la couche df une diminution (si H_1, H_2, H_3 sont vérifiées) de D_l :

$$d^2D_l = -\,K(i, l)\, dD\, df$$

dD et K(i, l) étant fonction de la hauteur l. Cette expression peut s'écrire :

$$\frac{d(dD_l)}{dD} = - K(i, l)\, df$$

et une première intégration conduit à :

$$\frac{dD_l}{dD_0} = \exp(- K(i, l).f).$$

Pour obtenir le rayonnement diffus du ciel D incident sur un plan horizontal au

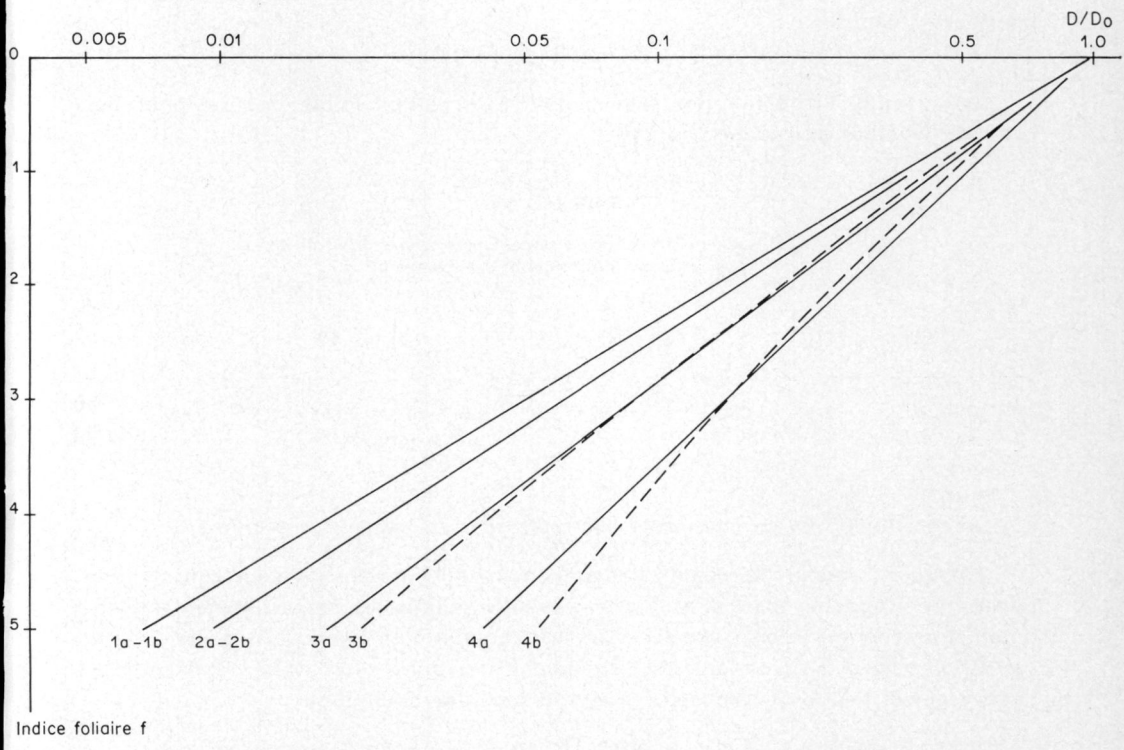


FIG. 1. — *Pénétration du rayonnement solaire diffus du ciel en fonction de l'indice foliaire* f *d'une culture pour différentes inclinaisons des feuilles* i.

D_0 : rayonnement diffus du ciel reçu sur un plan horizontal au-dessus de la culture ;
D : rayonnement diffus du ciel reçu sur un plan horizontal au niveau f dans une culture ;
a : lois établies avec les coefficients moyens K' : $D = D_0\, e^{-K'f}$, cf. tableau 3.

Inclinaison des feuilles i	K'
1) 5°	0,99
2) 25°	0,93
3) 45°	0,81
4) 65°	0,65

b : lois tenant compte d'une répartition des luminances de la voûte du ciel de type « Standard Overcast Sky » (§ 22).

niveau f, il est nécessaire de faire une sommation des différents dD_l selon toutes les hauteurs :

$$D = \int_{l=0}^{l=\pi/2} dD_0 \exp(- K(i, l).f)$$

dD_0 dépend de l (voir ci-dessus) et K(i, l) est une fonction complexe de l pour $i > l$.

Nous avons donc procédé à une intégration numérique et la figure 1 montre les profils de D/D_0 aux différents niveaux f d'une culture dont les feuilles ont une inclinaison constante i. Pour des inclinaisons des feuilles faibles ces profils sont très proches d'une atténuation exponentielle ; dans un but de simplification nous avons également évalué, par ajustement linéaire sur les représentations graphiques de D/D_0 à des intervalles de 0,1 en f, un coefficient d'extinction moyen K'(i) pour des indices foliaires inférieurs à cinq :

$$D = D_0 \exp(- K'(i, f).f).$$

Les erreurs introduites par cette hypothèse 4 restent faibles surtout pour des couverts végétaux peu érigés (fig. 1).

TABLEAU 3

Valeurs de la fonction d'extinction du rayonnement solaire diffus du ciel K' pour différentes inclinaisons des feuilles i

i (deg)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
K'	1,00	1,00	0,97	0,93	0,87	0,81	0,73	0,65	0,57	0,49

2.3. — *Pénétration des rayonnements interceptés par les feuilles et rediffusés*

Lorsqu'une feuille intercepte un rayonnement, elle en réfléchit et en transmet une partie ; nous appellerons T et A les énergies ainsi rediffusées, respectivement descendante et ascendante, reçues sur des plans horizontaux à un niveau f dans une culture.

Considérons le rayonnement descendant T arrivant sur la couche de niveau f et d'épaisseur df ; en traversant cette couche, il subit une diminution :

$$- TK'' df.$$

Si l'hypothèse 5 est vérifiée, c'est-à-dire, si les rayonnements interceptés et rediffusés sont isotropes à chaque niveau dans la culture, il est possible d'évaluer le facteur d'interception K''. Soit T_l la part du rayonnement descendant T fourni par la couronne dl de hauteur l ; on a (Perrin de Brichambaut, 1963) :

$$T_l/T = 2 \sin l \cos l \, dl.$$

Dans la couche df, chaque éclairement T_l subit une diminution que l'on sait évaluer en assimilant chaque élément de couronne élémentaire de la voûte à luminance constante au cas d'un rayonnement solaire direct :

$$- T_l K(i, l) df.$$

On en déduit :

$$- TK'' \, df = - df \int_1 T_1 \, K(i, l) \, dl$$

$$= - T \, df \int_1 2 \sin l \cos l \, K(i, l) \, dl$$

qui permet d'évaluer K'' :

$$K'' = \int_1 2 \sin l \cos l \, K(i, l) \, dl.$$

TABLEAU 4

Valeurs de la fonction d'extinction des rayonnements interceptés et rediffusés dans la culture K'' pour différentes inclinaisons des feuilles i

i (deg)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
K''	1,000 0	0,999 1	0,997 2	0,995 4	0,993 7	0,992 2	0,991 0	0,990 0	0,989 3	0,989 0

Le tableau 4 donne les valeurs de K'' calculées pour différentes inclinaisons des feuilles ; il est à noter que ce facteur d'interception varie très peu et pourra être pris égal à 1,00 dans les applications numériques courantes.

Une partie de ce rayonnement intercepté est rediffusée vers le bas et une autre vers le haut ; si l'hypothèse 6 est vérifiée, c'est-à-dire, si les facteurs de réflexion et de transmission de la feuille sont égaux ($R = \tau$), ces deux énergies sont égales en valeur absolue à :

$$TK'' \, R \, df.$$

La lumière rediffusée vers le bas ou vers le haut enrichit respectivement T et A. Les rayonnements solaires direct et diffus, interceptés et rediffusés augmentent également T et A dans chaque couche.

Le bilan algébrique des rayonnements T rediffusés vers le bas est donc (si f est orienté vers le bas) :

$dT = - K'' T \, df$	T intercepté par la couche
$+ K'' TR \, df$	T intercepté et rediffusé vers le bas
$+ K'' AR \, df$	A intercepté et rediffusé vers le bas
$+ \lvert dS \rvert R$	Direct intercepté et rediffusé vers le bas
$+ \lvert dD \rvert R$	Diffus intercepté et rediffusé vers le bas

et de façon analogue pour les rayonnements A rediffusés ascendants :

$$dA = K'' A df - K'' TR \, df - K'' AR \, df - \lvert dS \rvert R - \lvert dD \rvert R.$$

2.4. — *Résolution des équations*

Les équations relatives aux rayonnements solaires direct et diffus :

$$dS = -K(i, h)\, S\, df$$
$$dD = -K'(i)\, D\, df$$

conduisent à :

$$S = S_0\, e^{-Kf}$$

$K = K(i, h)$; h : hauteur du soleil; i : inclinaison des feuilles (cf. tabl. 2);

$$D = D_0\, e^{-K'f}$$

$K'(i)$: (cf. tabl. 3).

Les rayonnements rediffusés vers le bas ou vers le haut conduisent à un système d'équations différentielles :

$$dT = -K''(1 - R)\, T\, df + K''\, AR\, df + K\, SR\, df + K'\, DR\, df \qquad (a)$$
$$dA = \quad K''(1 - R)\, A\, df - K''\, TR\, df - K\, SR\, df - K'\, DR\, df\,. \qquad (b)$$

Kubelka et Munk (1931) ont donné la méthode de résolution de ces équations : on extrait T de (*b*), on calcule dT/df et l'on substitue ces deux termes dans (*a*) ; cela conduit à :

$$d^2T/df^2 - \alpha^2\, T = -RK\,(K'' + K)\, S_0\, e^{-Kf} - RK'(K'' + K')\, D_0\, e^{-K'f}$$
$$d^2A/df^2 - \alpha^2\, A = -RK\,(K'' - K)\, S_0\, e^{-Kf} - RK'(K'' - K')\, D_0\, e^{-K'f}$$

avec :

$$\alpha = K''\sqrt{1 - 2R}\,.$$

Les solutions générales de ces deux équations différentielles sans second membre sont :

$$T = C_1\, e^{\alpha f} + C_2\, e^{-\alpha f}$$
$$A = C_3\, e^{\alpha f} + C_4\, e^{-\alpha f}$$

et doivent satisfaire simultanément à (*a*) et (*b*) quel que soit f ; cette condition impose :

$$C_1 = C_5(1 - \beta) \qquad C_3 = C_5(1 + \beta)$$
$$C_2 = C_6(1 + \beta) \qquad C_4 = C_6(1 - \beta)$$

avec :

$$\beta = \sqrt{1 - 2R}\,.$$

Les solutions générales des équations entières sont donc de la forme :

$$T = C_5(1 - \beta)\, e^{\alpha f} + C_6(1 + \beta)\, e^{-\alpha f} + C_7\, e^{-Kf} + C_8\, e^{-K'f}$$
$$A = C_5(1 + \beta)\, e^{\alpha f} + C_6(1 - \beta)\, e^{-\alpha f} + C_9\, e^{-Kf} + C_{10}\, e^{-K'f}\,.$$

Si l'on reporte ces expressions de T et A dans le système d'équations (*a*) et (*b*), il est possible d'évaluer les constantes :

$$C_7 = KS_0\, R(K'' + K)/\Delta_1 \qquad (2)$$
$$C_8 = K'\, D_0\, R(K'' + K')/\Delta_2 \qquad (3)$$
$$C_9 = KS_0\, R(K'' - K)/\Delta_1 \qquad (4)$$
$$C_{10} = K'\, D_0\, R(K'' - K')/\Delta_2 \qquad (5)$$

avec :
$$\Delta_1 = \alpha^2 - K^2$$
$$\Delta_2 = \alpha^2 - K'^2.$$

C_5 et C_6 sont définies par les conditions aux limites :

— Sommet de la culture : $f = 0 \quad T = 0 \quad S = S_0 \quad D = D_0$.

— Base de la culture : $f = F \quad A(F) = a[T(F) + S(F) + D(F)]$ où F est l'indice foliaire total de la culture, a l'albédo du sol nu sous la culture.

On obtient alors :

$$C_5 = \frac{-1}{\Delta}\{(C_7 + C_8)[(1+\beta)a - (1-\beta)]e^{-\alpha F} + (1+\beta)(C_9 - aC_7 - aS_0)e^{-KF} + (1+\beta)(C_{10} - aC_8 - aD_0)e^{-K'F}\} \quad (6)$$

$$C_6 = \frac{1}{\Delta}\{(C_7 + C_8)[a(1-\beta) - (1+\beta)]e^{\alpha F} + (1-\beta)(C_9 - aC_7 - aS_0)e^{-KF} + (1-\beta)(C_{10} - aC_8 - aD_0)e^{-K'F}\} \quad (7)$$

avec : $\Delta = (1+\beta)^2 e^{\alpha F} - (1-\beta)^2 e^{-\alpha F} - a(1-\beta^2)(e^{\alpha F} - e^{-\alpha F})$.

2.5. — *Rappel des solutions*

TABLEAU 5

Rappel des solutions

Données de départ

Rayonnement diffus au-dessus de la culture (plan horizontal)	D_0
Rayonnement direct au-dessus de la culture (plan horizontal)	S_0
Hauteur du soleil	h
Indice foliaire total de la culture	F
Inclinaison moyenne des feuilles	i
Facteur de réflexion des feuilles	R
Facteur de réflexion du sol sous la culture	a

Hypothèses H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, et H_6 vérifiées.

Calcul de fonctions et constantes intermédiaires

K = K(i, h) : fonction d'extinction du rayonnement solaire direct ; calcul selon formule (I) ou donné par le tableau 2 ;
K′ : fonction d'extinction du rayonnement solaire diffus (cf. tabl. 3) ;
K″ : fonction d'extinction des rayonnements rediffusés (cf. tabl. 4).

$$\alpha = K''\sqrt{1-2R},$$
$$\beta = \sqrt{1-2R},$$
$$\Delta_1 = \alpha^2 - K^2,$$
$$\Delta_2 = \alpha^2 - K'^2,$$
$$\Delta = (1+\beta)^2 e^{\alpha F} - (1-\beta)^2 e^{-\alpha F} - a(1-\beta^2)(e^{\alpha F} - e^{-\alpha F}).$$

Constantes C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_5, C_6 données par les formules (2), (3), (4), (5), (6), (7).

Résultats

Il est possible de calculer sur un plan horizontal à un niveau f quelconque dans la culture :

— le rayonnement solaire direct $S_0 e^{-Kf}$;

— le rayonnement solaire diffus du ciel $D_0 e^{-K'f}$;

— les rayonnements interceptés et rediffusés T (descendant) et A (ascendant) :

$$T = C_5(1-\beta)e^{\alpha f} + C_6(1+\beta)e^{-\alpha f} + C_7 e^{-Kf} + C_8 e^{-K'f}$$

$$A = C_5(1+\beta)e^{\alpha f} + C_6(1-\beta)e^{-\alpha f} + C_9 e^{-Kf} + C_{10} e^{-K'f}.$$

III. — Vérifications expérimentales

Nous avons choisi, pour tester notre méthode de calcul, des données qui ont été présentées dans la série de travaux « Assimilation nette, utilisation de l'Eau et microclimatologie d'un champ de maïs » : Bonhomme *et al.* (1971) et Varlet-Grancher (1974).

3.1. — *Matériel et techniques*

La parcelle réservée aux mesures couvre une superficie de 0,5 ha au milieu d'un champ de 2,5 ha, situé à La Minière près de Versailles (2° Est, 49° Nord). La variété de maïs cultivée (INRA F7 × EP1 : hybride simple) est semée à raison de 90 000 pieds par hectare. Un dispositif d'irrigation nocturne assure aux plantes une réserve hydrique toujours suffisante.

Les mesures du rayonnement global G_0, du rayonnement diffusé par le ciel et les nuages D_0, du rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-culture A_0, sont effectuées par trois pyranomètres de Moll placés horizontalement. Le premier donne G_0, le second muni d'une bande pare-soleil de type Schuepp, D_0, le troisième, dirigé vers le bas et toujours placé à un mètre au-dessus de la culture, A_0. A partir de D_0 et G_0 on peut calculer le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal $S_0 = (G_0 - D_0)/\sin h$, h étant la hauteur du soleil.

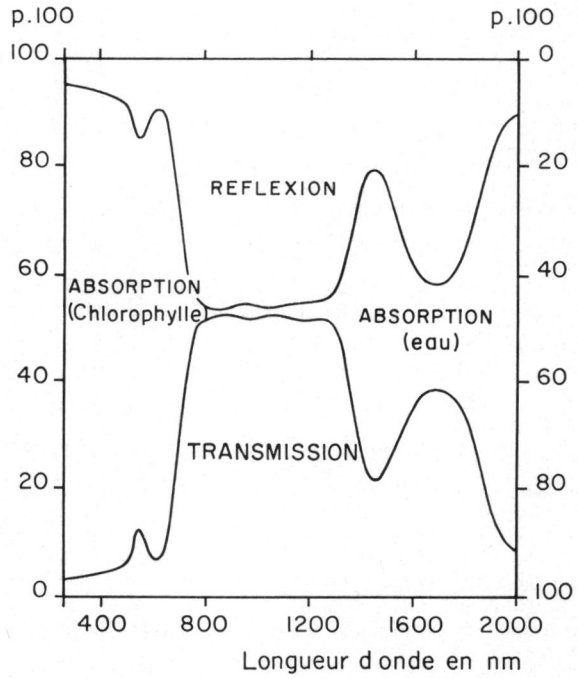


FIG. 2. — *Variations des facteurs de réflexion et de transmission d'une feuille en fonction de la longueur d'onde* (d'après Knipling, 1970).

Dans le couvert végétal les mesures d'éclairement énergétiques sont effectuées par des pyranomètres linéaires (Combres *et al.*, 1970). L'évaluation des rayonnements diffus descendants dans la végétation nécessite en outre l'emploi de caches pare-soleil.

L'indice foliaire est déterminé, sur 5 m² de végétation, après découpe du feuillage en mesurant les segments de feuilles assimilés à des rectangles ou à des triangles, puis en sommant les surfaces élémentaires. La mesure de l'inclinaison des feuilles conduit à une valeur moyenne i proche de 55°.

Les lois que nous avons établies ne sont applicables qu'à des énergies monochromatiques correspondant à une longueur d'onde donnée.

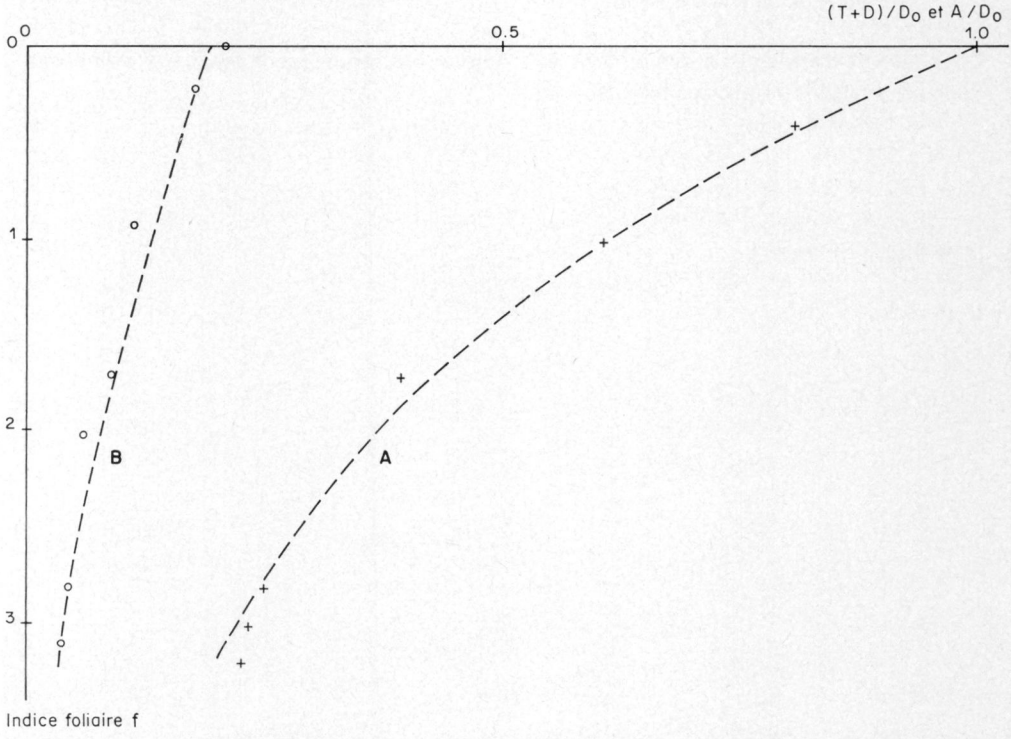


FIG. 3. — *Profils des rayonnements descendants et ascendants dans une culture de Maïs. Ciel couvert.*

A. — Profils des rayonnements descendants calculés $(T + D)/D_0$ (*).

D_0 : rayonnement solaire diffusé par le ciel et reçu au-dessus de la culture ;
D : rayonnement solaire diffusé par le ciel et reçu à un niveau f dans la culture ;
T : rayonnements interceptés et rediffusés vers le bas par les feuilles à un niveau f dans la culture.
+ + : Mesure des rayonnements descendants.

B. — Profils des rayonnements ascendants calculés A/D_0 (*)

A : rayonnements interceptés et rediffusés vers le haut par les feuilles à un niveau f dans la culture.
o o : Mesure des rayonnements ascendants.

(*) : Pour les calculs : indice foliaire total de la culture F = 3,4 ; inclinaison moyenne des feuilles i = 55° ; facteur de réflexion des feuilles dans le visible $R_{vis} = 0,1$; facteur de réflexion des feuilles dans le proche infrarouge $R_{pir} = 0,4$; facteur de réflexion du sol dans le visible $a_{vis} = 0,15$; facteur de réflexion du sol dans le proche infrarouge $a_{pir} = 0,15$.

Nous considérerons que les rayonnements solaires fournissent le même éclairement dans chacune des bandes : visible (400-700 nm) et proche infra-rouge (700-2 000 nm) et que toute l'énergie est comprise dans ces deux bandes ; cette hypothèse est assez voisine des résultats expérimentaux (Varlet-Grancher, 1975).

Dans chacune de ces deux bandes spectrales, les propriétés optiques des feuilles seront considérées comme constantes et l'hypothèse 6 d'égalité entre réflexion et transmission vérifiée (fig. 2, d'après Knipling, 1970). Compte tenu également des mesures de Thomas *et al.* (1977) nous prendrons les valeurs moyennes du facteur de réflexion des feuilles R et du sol a :

— Bande visible : $R = 0{,}10$ $a = 0{,}15$.
— Bande proche infra-rouge : $R = 0{,}40$ $a = 0{,}15$.

Les lois théoriques peuvent donc être appliquées séparément aux deux domaines spectraux visible et proche infra-rouge.

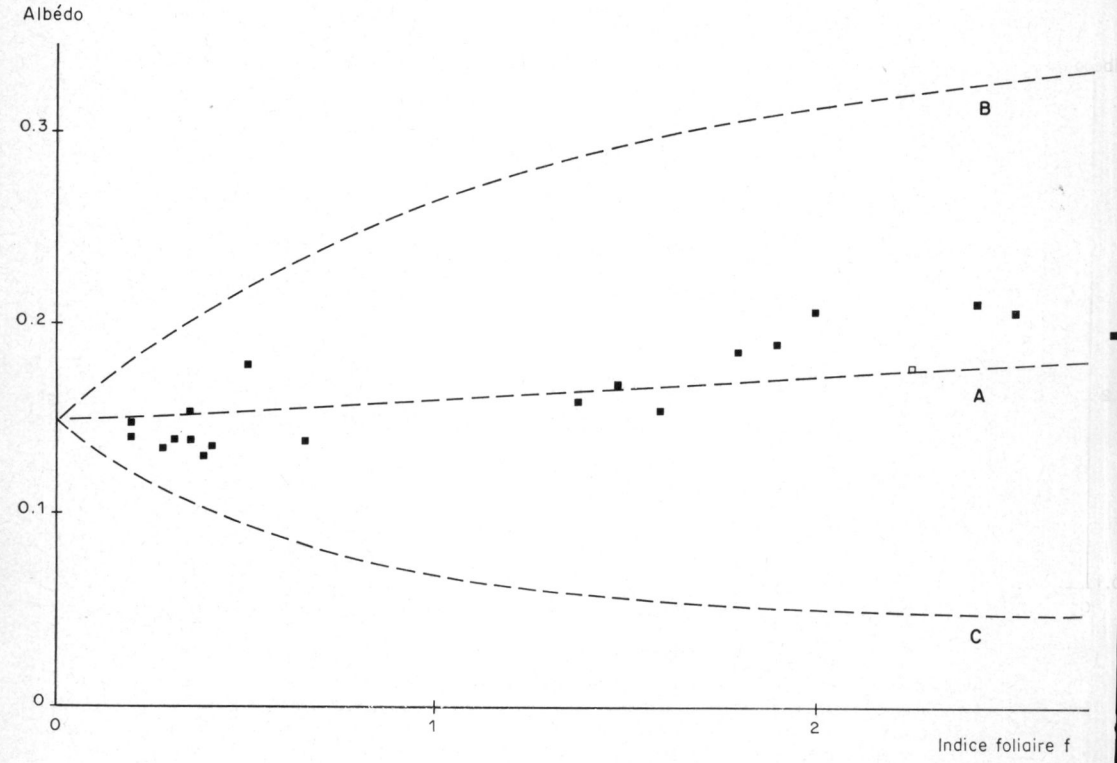


FIG. 4. — *Evolution de l'albédo d'une culture de Maïs en fonction de l'indice foliaire total* F *de la culture. Ciel couvert.*

A. — Evolution calculée, en supposant l'égalité de l'énergie solaire incidente dans la bande visible (D_{0VIS}) et proche infrarouge (D_{0PIR}) ; ■ — Mesures (valeurs journalières) ; Pour les calculs : idem figure 3.

B. — Evolution calculée de la part d'énergie solaire proche infrarouge réfléchie par la culture.

C. — Evolution calculée de la part d'énergie solaire visible réfléchie par la culture.

3.2. — *Profils des rayonnements diffus descendant et ascendant dans la culture*

La figure 3 montre le bon accord entre les profils calculés et mesurés (moyenne de différentes heures de plusieurs jours) des rayonnements diffus descendants $(T + D)/D_0$ et ascendants A/D_0 par ciel couvert.

Compte tenu des difficultés expérimentales, les profils des rayonnements ascendants et descendants ne peuvent être mesurés par ciel clair.

3.3. — *Variations de l'albédo de la culture*

Lorsque l'indice foliaire d'une culture augmente, la part d'énergie visible réfléchie diminue, mais celle d'énergie infrarouge augmente de façon plus importante ; il en résulte que l'albédo du couvert végétal croît légèrement avec son développement et la figure 4 montre que les valeurs mesurées et calculées sont très comparables.

Par ciel couvert notre méthode de calcul donne un albédo qui ne varie pas au cours de la journée ; la valeur voisine de 0,20 estimée sur culture de Maïs adulte correspond assez bien aux mesures bien que celles-ci présentent certaines variations sans doute en fonction de la couverture du ciel.

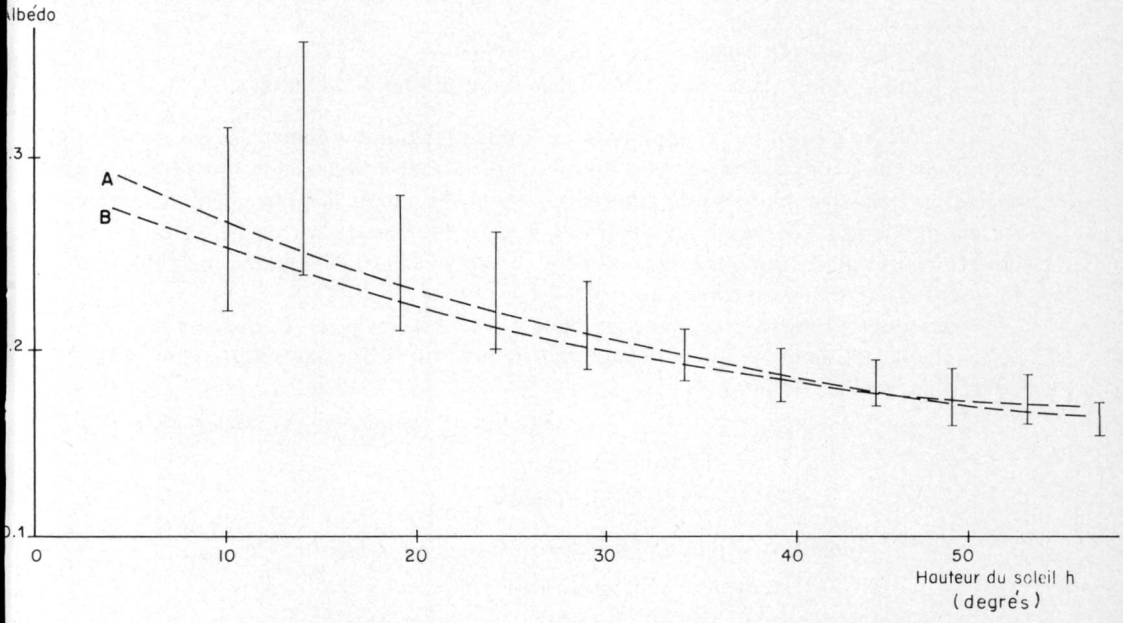


FIG. 5. — *Variation de l'albédo d'une culture de Maïs en fonction de la hauteur du soleil* h.

A. — Albédo calculé (*) pour $D_0/G_0 = 0,1$

D_0 : rayonnement solaire diffus reçu au-dessus de la culture ;
G_0 : rayonnement solaire global reçu au-dessus de la culture.

B. — Albédo calculé (*) pour $D_0/G_0 = 0,25$

I Mesures (avec leur intervalle de confiance) ;

(*) Pour les calculs : indice foliaire total de la culture $F = 2,5$; inclinaison moyenne des feuilles $i = 55^o$; $R_{vis} = 0,1$; $R_{pir} = 0,4$; $a_{vis} = a_{pir} = 0,15$.

Par ciel clair l'albédo diminue lorsque la hauteur du soleil croît et ce résultat est bien simulé par les calculs (fig. 5). Il faut signaler cependant que pour les incidences rasantes du soleil l'albédo mesuré est sensiblement plus élevé compte tenu peut-être de réflexions spéculaires non négligeables de la culture.

IV. — Conclusion.

Bien que leur établissement suppose un certain nombre d'hypothèses simplificatrices au niveau des rayonnements et de la culture, les équations de Kubelka et Munk conduisent à des lois qui rendent bien compte des variations des profils de rayonnements ascendant ou descendant. Les seules variables nécessaires pour leur utilisation sont :

— les rayonnements solaires direct et diffus sur un plan horizontal au-dessus de la culture,
— la hauteur du soleil,
— l'inclinaison moyenne des feuilles (supposée constante),
— le coefficient de réflexion des feuilles (supposé identique au coefficient de transmission),
— le coefficient de réflexion du sol sous la culture,
— l'indice foliaire par couche et l'indice foliaire total de la culture.

Ces lois ne peuvent être appliquées que dans les bandes spectrales où les différentes variables sont constantes et il est donc possible de comparer la transmission et la réflexion de rayonnements de différentes longueurs d'onde. De plus, l'établissement des équations fait intervenir les différents angles d'incidence ou de réflexion de la lumière ce qui peut permettre de traiter les cas de surfaces diversement orientées ou de visées à différentes inclinaisons.

Nous nous proposons de montrer dans des travaux ultérieurs que ces lois sont un excellent outil pour analyser la captation de la lumière par une culture et la réflectance d'un couvert végétal.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy

I. — *Computation and comparison with experimental values*

The Kubelka-Munk (K-M) theory has been applied to light penetration in the plant canopy. With these relations it is possible to calculate the upward and downward radiations at each level in the crop. Therefore it is necessary to know :

— direct and diffuse solar radiation received on an horizontal plane above the crop,
— solar altitude,
— mean leaf inclination,
— leaf reflectance (supposed identical with leaf transmittance),
— soil reflectance under the canopy,
— leaf area index,

and to assume some simplications for the leaf and light distribution.

The variations of albedo and solar radiation profiles computed for a maize crop are in good agreement with measurements.

Zusammenfassung

Anwendung der strahlungsgesetzen in zerstreuender umgebung für pflanzendecken

I. — Festlegung der gesetzen und experimentelle bestätigung

Kubelkas und Munks Gesetzen über die Lichtausbreitung in zerstreuender Umgebung wurden für die Kulturen angewandt. Sie erlauben die aufwärts und abwärts wirkenden Energien in einer Pflanzendecke an einer durch den sie überhängenden Blattflächenindex charakterisierten öhe analytisch u errechnen, indem man

— die direkte, und zerstreute Sonnenstrahlung auf einer horizontalen Ebene über der Kultur,
— die Sonnenhöhe,
— den mittleren Blattein fallwinkel,
— den Reflexionskoeffizient der Blätter (als dem übertragungskoeffizient ähnlich angenommen),
— den Bodenreflexionskoeffizient unter der Kultur,
— den gesamten Blattflächenindex der Kultur kennt.

Obgleich die Festlegung der Gesetzen eine gewisse Zahl von Vereinfachungshypothesen mit hineinzieht, sind die in einer Maiskultur erzielten experimentellen Nachprüfungen in guter übereinstimmung mit den errechneten Werten sowohl für die Profile der aufwärts und abwärts wirkenden Streustrahlen als auch für die Albedoschwankungen mit dem Blattflächenindex oder der Sonnehöhe.

РЕЗЮМЕ

Применение к растительным покровам законов излучения в рассеивающей среде.

1. — Установление законов и экспериментальные проверки

Р. БОНОММ, К. ВАРЛЕ-ГРАНШЕ.

законы Кубелки и Мунка о распространении света в рассеивающей среде применялись к культурам. Законы эти позволяют аналитическим способом рассчитать энергии нисходящие и восходящие в растительном покрове, на уровне нависающего над ним листового признака, если известны :

— как прямые, так и рассеянные в горизонтальном плане над культурой, солнечные излучения ;
— положение солнца ;
— средний листовой наклон ;
— коеффициент листового отражения (предполагается его идентичность с коеффициентом трансмиссии) ;
— коеффициент отражения почвы под кудьтурой ;
— общий листовой признак культуры ;

Результаты полученные на культуре кукурузы находятся в полном соответствии с рассчитанными величинами, как в отношении профилей рассеянного нисходящего или восходящего излучения, так и в отношении изменений альбедо связанных с листовым признаком, или положением солнца, несмотря на то что их экспериментальная проверка требует применения некоторых упрощающих гипотез.

Références bibliographiques

ALDERFER R., 1973. Interaction of Solar radiation with Plant systems. *Solar Energy*, **15**, 77-82.

ALLEN W. A., RICHARDSON A. J., 1968. Interactions of light with a canopy. *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 1023-1028.

ALLEN W. A., GAYLE T. V., RICHARDSON A. J., 1970. Plant canopy irradiance specified by the Duntley equations. *J. Opt. Soc. Amer.*, **60**, 372-376.

BONHOMME R., 1976. Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites *in situ*. *Ann. agron.*, **27**, (1), 33-59.

BONHOMME R,. CHARTIER P., VARLET-GRANCHER C., 1972. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. II. — Eclairement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture. *Ann. agron.*, **22** (4), 383-396.

BUNNIK N. J. J., VERHOEF W., 1974. The spectral directional reflectance of agricultural crops. Measurements on a wheat and a grass canopy for some stages of growth. *NIWARS Publication* n° 23, Delft, 123 p.

CHARTIER P., 1966. Etude du microclimat dans la végétation. *Ann. agron.*, **17,** 571-602.

COMBRES J. C., BONHOMME R., BALDY C., GOILLOT C., de PARCEVAUX S., 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à mesurer le rayonnement sous couvert végétal. *Techniques d'études des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A., Paris, 59-70.

DE WIT C. T., 1965. *Photosynthesis of leaf canopies*. Agric. Res. Rept. n° 663. Centre for Agric. Publ. and Doc., Wageningen, 57 p.

DUNTLEY S. Q., 1942. The Optical Properties of Diffusing Materials. *J. of the Opt. Soc. of America*, **32** (2), 61-70.

KNIPLING E. B., 1970. Physical and physiological Basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sens. of Environment*, 1, 155-159.

KUBELKA P., MUNK F., 1931. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zeits. fürtechn. Physick.*, **12,** 593-601.

LEMEUR R., BLAD B. L., 1974. A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. *Agric. Met.*, **14,** 255-286.

MONSI M., SAEKI T., 1953. Uber den Lichtfaktor in den Planzengesellscheften und Seine Bedentung fur die Stroffproduction. *Jap. J. Bot.*, **14,** 22-52.

MOON P., SPENCER D. E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **37,** 707-712.

PERRIN DE BRICHAMBAUT C., 1963. *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*. Gauthier Villars, Paris, 300 p.

SUITS G. H., 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sens. of Environment*, 2, 117-125.

SUITS G. H., SAFIR G. R., 1972. Verification of a reflectance model for mature corn with applications to corn blight detection. *Remote Sens. of Environment*, 2, 183-192.

THOMAS D. A., REBELLA C., CHARTIER P., 1977. An analysis of the vertically reflected radiation from a maize crop as a possible means of determining its biomass and water content. *Agric. Met.*, **18,** 101-114.

VARLET-GRANCHER C., 1974. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. V. — Quantité et qualité de la lumière solaire réfléchie. *Ann. agron.*, **25** (6), 797-810.

VARLET-GRANCHER C., 1975. Variation et estimation de l'énergie solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables. *Ann. agron.*, **26** (3), 245-264.

VERHOEF W., BUNNIK N. J. J., 1975. A model study on the relations between crop characteristic and canopy spectral reflectance. *NIWARS Publication* n° 33, Delft, 89 p.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 583-597.

Comportement photosynthétique du Noyer (*Juglans regia*). Premières observations sur un couvert continu obtenu à partir d'un semis haute densité

M. ROBELIN et J. C. MAUGET

avec la collaboration de M. MARTIGNAC

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
12, *Avenue de l'Agriculture*, 63100 *Clermont-Ferrand*

Résumé

Dans le cadre d'une étude de l'influence de la structure de l'arbre sur sa photosynthèse, le premier examen, dans de grandes enceintes de photosynthèse, d'un couvert compact de jeunes noyers, montre un comportement analogue à celui d'un couvert prairial avec cependant une tendance à une plus faible efficience aux forts éclairements.

La liaison photosynthèse brute-lumière au niveau du couvert peut se formuler selon le modèle éprouvé au niveau de la feuille.

Il n'apparaît pas de saturation lumineuse mais plutôt une déviation, en cours de matinée et par journée très ensoleillée, d'une première fonction $P_N = f(E)$ matinale, vers une deuxième fonction, nettement moins efficiente. Les causes de cette double courbe de réponse à la lumière, d'ailleurs non particulière à ce végétal, sont discutées.

Le couvert ayant atteint son plein développement garde une capacité photosynthétique constante pendant près de 2 mois puis cette capacité décline pour atteindre, en un mois, au premier signe de jaunissement du feuillage, 1/10 de la valeur antérieure.

Introduction

L'élaboration de la production agricole utile est évidemment corrélée avec l'activité photosynthétique du couvert ; cette évidence présente cependant des insuffisances :

1) La production utile repose également sur des phénomènes d'organogenèse qui ne sont pas reliés uniquement à l'activité photosynthétique ;

2) le fait que la mise en place des structures du végétal selon la programmation de l'organogenèse s'adapte le plus souvent au niveau du métabolisme primaire, n'exclut pas que le métabolisme primaire ne puisse, en une sorte de corollaire, être limité par la vitesse de déroulement de ce programme.

Le comportement photosynthétique du couvert reste un excellent reflet des potentialités de croissance à un instant donné, mais son examen ne peut constituer une démarche explicative univoque de la croissance et *a fortiori* de la productivité.

Pris comme simple test de croissance instantanée, il permet cependant d'analyser les rôles respectifs de différents facteurs d'action d'ordre endogène, structural ou environnemental.

Nous nous plaçons pour l'instant dans ce cadre restreint et nous nous posons à propos du Noyer la question suivante :

— Quelle est l'influence de l'organisation du feuillage dans l'espace sur les possibilités photosynthétiques prises au niveau du couvert ou au niveau de l'arbre ?

Notre approche est la suivante :

1) Dans une première expérience correspondant d'ailleurs à une première année culturale, nous évaluerons les potentialités photosynthétiques d'un couvert dense et continu.

2) Au cours des années successives, nous suivrons l'évolution de ces potentialités au fur et à mesure que le couvert changera de structure avec la diminution du nombre (éclaircissage), l'augmentation de la hauteur et de la ramification des jeunes noyers.

3) Après acquisition de cette information sur des couverts de structures différentes, pratiquement homogènes dans un plan horizontal, nous en examinerons les conséquences au niveau de l'arbre, considérant la couronne comme un simple gauchissement du plan.

Nous rapportons les premières évaluations obtenues à partir d'un semis de très haute densité.

Méthode

La fixation nette du CO_2(P_N) de la culture testée est déterminée périodiquement sous éclairement naturel au cours de un ou deux cycles journaliers. Les bilans d'échanges de gaz carbonique au niveau du couvert permettent de suivre l'évolution de P_N en fonction des variations naturelles du rayonnement incident E au cours d'une journée. L'évolution des courbes de réponse $P_N = f(E)$ en cours de végétation met en évidence l'effet de l'évolution de l'état du couvert.

On peut suivre sur la figure 1 le principe de cette détermination (Robelin, 1972).

L'unité expérimentale (1) est constituée d'un bac mobile ($2 \times 1 \times 0{,}5$ m) rempli d'un sol chimiquement riche et bien structuré supportant le peuplement végétal choisi. Cette parcelle est placée au moment voulu sous une hotte en plexiglass (2), de hauteur réglable, et lui est reliée de manière étanche par une housse (film plastique) (3). Le positionnement de la hotte est réglé de telle sorte que les bouches de circulation d'air sont situées juste au-dessus du couvert. L'ensemble est bouclé par les conduites (4) sur un climatiseur (5). Un ventilateur à vitesse réglable (6) assure la circulation de l'air à l'intérieur du système.

La teneur en gaz carbonique dans l'enceinte est contrôlée en permanence sur un circuit d'air monté en dérivation (7). Lorsque la teneur descend à — 30 vpm de la teneur de régulation, elle déclenche l'injection d'une quantité de CO_2 pur telle que la concentration est ramenée à + 30 vpm de cette teneur. En période nocturne, la concentration s'élève du fait de la respiration; on tolère une élévation de + 100 vpm puis on provoque des échanges avec l'atmosphère extérieure pendant un laps de

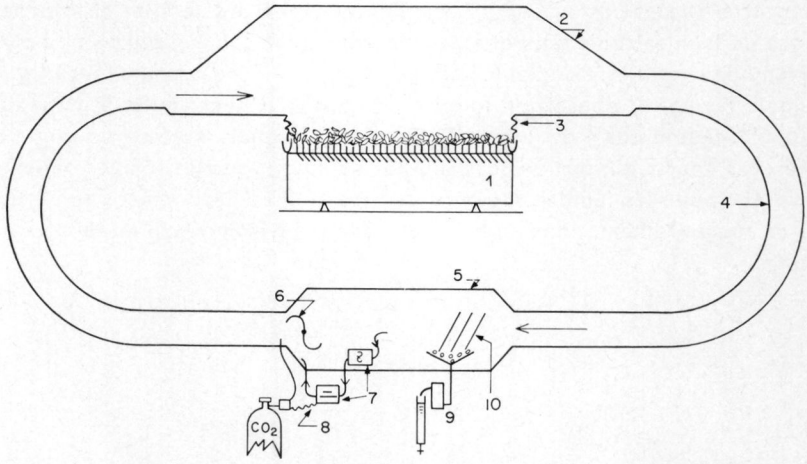


FIG. 1. — *Schéma de la chambre de mesure de la photosynthèse nette du couvert (circuit fermé).*

1. Parcelle expérimentale mobile.
2. Hotte transparente de hauteur réglable.
3. Hausse de raccordement.
4. Conduites de raccordement au climatiseur.
5. Climatiseur.
6. Ventilateur à vitesse réglable.
7. Circuit d'analyse du CO_2.
8. Injection de CO_2 asservie à l'analyseur.
9. Système de contrôle de l'écoulement de l'eau condensée sur la batterie froide (10).

temps suffisant pour la ramener au voisinage de la teneur choisie pour l'expérience (dans la mesure où cette teneur est $>$ 300 vpm).

Les bilans sont établis toutes les 15 mn en tenant compte de la variation de concentration entre le temps t_0 et le temps t_{15} et du nombre d'injections.

Bien entendu, la nuit, la détermination n'est possible qu'en dehors des périodes d'échange avec l'extérieur.

L'eau condensée sur la batterie froide est recueillie dans un récipient thermostaté (8) dont le trop plein s'écoule en permanence dans une allonge. Un dispositif de contrôle de niveau permet la mesure en continu de l'écoulement. A l'hystérésis du système près, cet écoulement représente l'évapotranspiration du couvert.

Matériel végétal et conditions de végétation

Les noix de variété Lozeronne (voir à ce sujet Garavel, 1959) sont mises en place sur le bac de culture le 10 avril après une semaine de trempage, à raison de 100 m^{-2}.

La densité finalement obtenue est de 50 m^{-2}.

Le couvert, à la fin de l'expansion du système foliaire (10 août), possède les caractéristiques suivantes :

- Hauteur moyenne des axes porteurs : 7 à 8 cm.
- Nombre de feuilles : 7 à 9 par plant.
- Indice foliaire (LAI) : 5,35.

• *Caractéristiques du feuillage* : l'orientation exacte des folioles et la proportion de surface de feuilles contenue dans chaque tranche d'espace n'ont pu être mesurées compte tenu de la faiblesse du volume global occupé et de la densité du feuillage dans ce volume ; les points d'insertion foliaire sont situés à l'extrémité de l'axe sur une longueur n'excédant pas 4 cm ; les pétioles successifs font entre eux un angle d'environ 160° ; les angles d'insertion sont sub-horizontaux pour les feuilles de la base et d'environ 45° pour les feuilles supérieures ; les huit feuilles formées se répartissent ainsi assez régulièrement, dans un tronc de cône d'environ 40 cm de diamètre maximal (fig. 2).

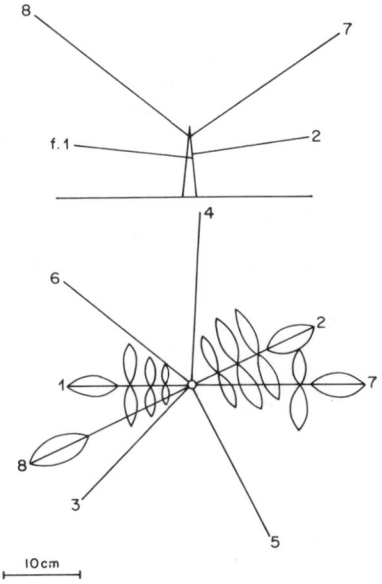


FIG. 2. — *Schéma de répartition du feuillage sur un jeune noyer ; élévation et plan (1-2... feuilles des différents niveaux d'insertion).*

L'interpénétration est très élevée : en chaque point du plan horizontal neuf plantes participent au recouvrement.

L'ensemble du feuillage occupe une couche dont l'épaisseur n'excède pas 25 cm ; le tassement, très élevé, peut être chiffré par la surface de feuilles développée par unité de volume « occupé » ; cet indice moyen est ici supérieur à 2 dm^2/dm^{-3}, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de celui existant pour une culture prairiale. Il n'est pas étonnant, dans ces conditions et compte tenu du port plutôt étalé des folioles de constater que le rayonnement solaire direct n'atteigne pratiquement jamais la surface du sol.

La parcelle expérimentale reste soumise au climat naturel pendant toute la période de végétation et est régulièrement irriguée.

Durant les périodes de mesure, les conditions imposées sont les suivantes :

rayonnement incident : lumière naturelle ;
température ambiante : $20 \pm 1°C$;
hygrométrie : 60 ± 2 p. 100 ;
vitesse moyenne de circulation de l'air au-dessus du couvert : 0,5 ms^{-1} ;
teneur en CO_2 : 300 ± 30 vpm.

Résultats

L'ensemble des contrôles se situe dans la période de vieillissement progressif du feuillage ; la surface foliaire maximale est atteinte, les axes ont cessé leur croissance. Ces contrôles se succéderont tous les 7 à 15 j, du mois d'août au mois de novembre, en choisissant, dans la mesure du possible, des journées bien ensoleillées.

Le comportement photosynthétique de ce couvert est examiné à deux échelles de temps :

— échelle journalière : photosynthèse nette (P_N) en fonction du rayonnement global incident sur un plan horizontal ;

— échelle de la saison : évolution de P_N en fonction de l'âge du couvert.

1. — *Comportement au cours d'une journée*

Nous prendrons à titre d'exemple la journée du 25/8/74 (fig. 3). Un pallier de photosynthèse apparaît vers 10 h pour les éclairements énergétiques supérieurs à 550 W m^{-2} ; nous pouvons percevoir une légère dissymétrie dans le temps de la position relative des courbes d'évolution de lumière et de photosynthèse ; pour un éclairement identique, la réponse photosynthétique est plus faible l'après-midi.

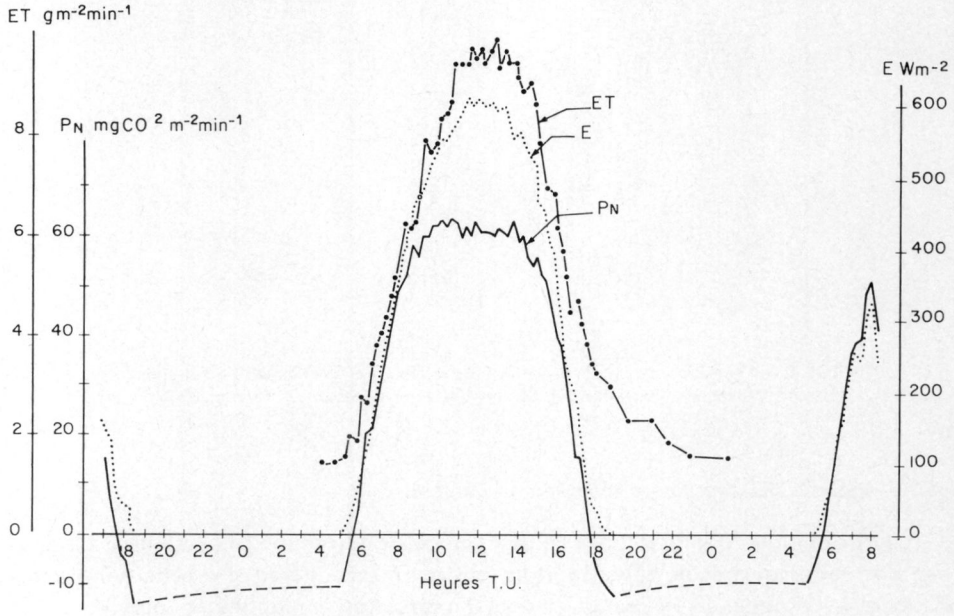


FIG. 3. — *Evolution de l'éclairement incident* (E), *de la photosynthèse nette* (P_N) *et de l'évapotranspiration* (ET) *au cours de la journée du* 25 août 1974 (ET est décalé de 45 mn pour tenir compte de l'inertie à l'écoulement).

La respiration nocturne du couvert (R_0) est de même légèrement plus forte en début qu'en fin de nuit.

Ce comportement se traduit par deux courbes de réponse à la lumière distinctes

(fig. 4), sensiblement parallèles dans la gamme d'éclairement comprise entre 100 et 500 W m^{-2}. Le passage de l'une à l'autre s'effectue en une heure environ alors que l'éclairement évolue de 550 à 600 W m^{-2} ; le phénomène s'amorce par une cassure assez brutale de la courbe matinale jusqu'alors régulièrement ascendante.

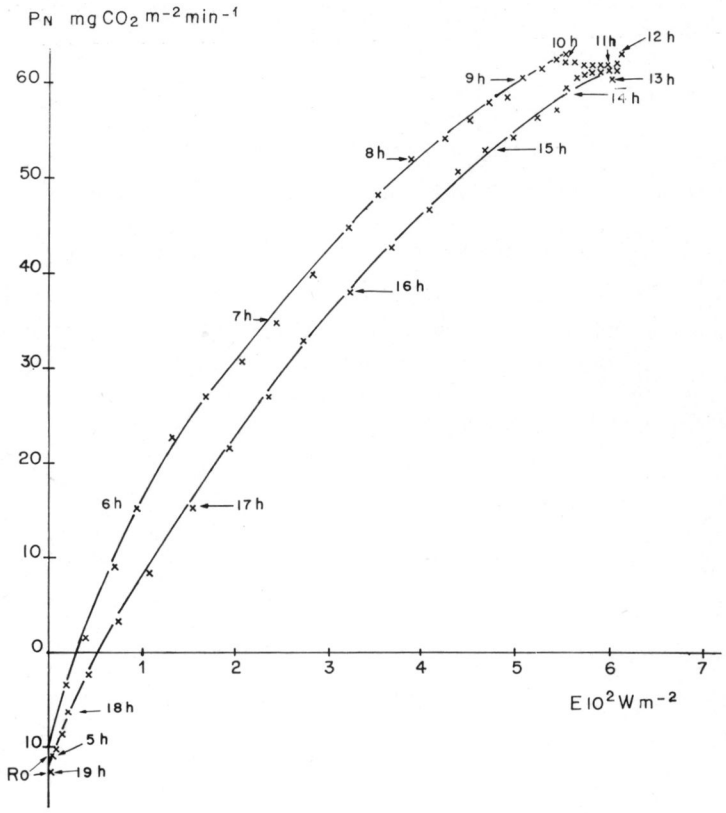


FIG. 4. — *Variation de la photosynthèse nette* (P_N) *en fonction de l'éclairement. Moyennes glissantes sur* 60 mn *des bilans établis en* 15 mn.

1.1. — *Analyses des courbes de réponse à la lumière.*

La variation de photosynthèse en fonction de l'éclairement se présente pour chacune des deux courbes de réponse de façon tout à fait analogue à celle mainte fois observée à l'échelle de la feuille et dont l'expression simplifiée la plus courante s'écrit :

$$P = P_N + R_0 = \frac{bE}{1 + aE} \qquad (1)$$

P = photosynthèse brute apparente ; R_0 = respiration à éclairement nul (en valeur absolue) ; b et a sont des constantes caractéristiques de l'état du matériel végétal et de l'environnement, à propos desquelles on peut remarquer que :

b est la valeur vers laquelle tend P/E lorsque E tend vers 0; elle représente l'efficience maximale de la lumière (α selon Chartier, 1966) ;

$b/a = P_{max}$ est la valeur vers laquelle tend P quand l'éclairement se déplace vers les valeurs très élevées.

Si le mode d'expression (1) peut s'appliquer ici, on disposera d'indices très simples et déjà classiques à une autre échelle, pour caractériser le comportement du couvert pris dans son ensemble.

Cette vérification peut commodément s'effectuer à partir de l'équation aux inverses :

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{b}\frac{1}{E} + \frac{a}{b}$$

fonction linéaire à laquelle devront s'ajuster les valeurs expérimentales.

La figure 5 nous montre que pour chacune des deux courbes, matinale ou vespérale, la fonction aux inverses peut être représentée par deux fonctions linéaires, valables chacune pour un domaine de variation de E.

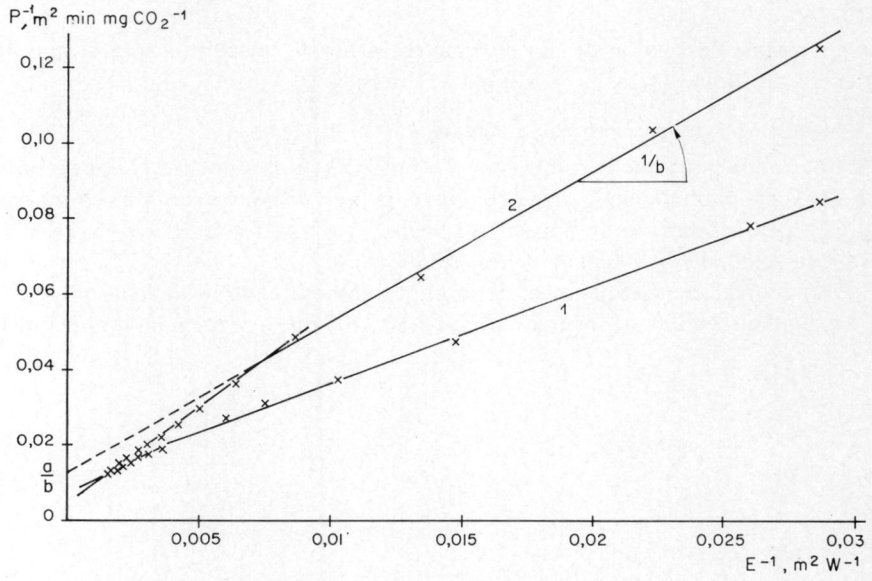


FIG. 5. — *Fonctions aux inverses* $P^{-1} = f(E^{-1})$.

1 : de 5 h à 9 h 30 TU .
2 : de 11 h à 19 h TU .

Nous pouvons distinguer ainsi les séquences indiquées au tableau 1.

Parmi les caractéristiques calculées, seules les efficiences maximales en début et en fin de journée ont une correspondance expérimentale concrète. Les autres ne sont que les paramètres de courbes d'ajustement: en particulier les P_{max} sont dans tous les cas largement supérieurs au maximum observé aux intensités lumineuses disponibles

TABLEAU 1

Caractéristiques des différentes séquences de réponse de la photosynthèse brute apparente à la lumière

Période (T. U.)		Intervalle de variation de E ($W\ m^{-2}$)	$P = f(E)$	α = efficience max. ($\mu g\ CO_2\ J^{-1}$)	$\frac{b}{a}$ = P max. théorique ($mg\ CO_2\ m^{-2}\ mn^{-1}$)
début de journée	5 h à 6 h 45 ...	0 à 210	$\frac{0{,}387\ E}{1 + 4{,}25.10^{-3}\ E}$	6,45	91
	6 h 45 à 9 h 45	210 à 550	$\frac{0{,}286\ E}{1 + 1{,}96.10^{-3}\ E}$	4,77	145
milieu et fin de journée	11 h à 17 h	600 à 135	$\frac{0{,}200\ E}{1 + 0{,}9.10^{-3}\ E}$	3,35	223
	17 h à 19 h	135 à 0	$\frac{0{,}258\ E}{1 + 3{,}32.10^{-3}\ E}$	4,31	78

(courbe de l'après-midi) ; par ailleurs la courbe du matin n'est plus suivie au-delà du seuil 550 $W\ m^{-2}$.

Néanmoins, l'évolution de ces paramètres présente un certain intérêt que nous discuterons plus loin.

1.2. — *Rendement de la conversion photosynthétique.*

Si nous admettons que la fixation de 1 mg de CO_2 correspond à la conversion de 11,4 J d'énergie photique en énergie chimique, le taux de conversion du rayonnement global (E) incident dans la photosynthèse brute (P) est de 7,3 p. 100 ($6{,}45.11{,}4.10^{-1}$) au lever du soleil, 4,9 p. 100 au coucher.

Le rendement énergétique réel de la photosynthèse nette (N) évolue en fonction de E (fig. 6), il atteint la valeur maximale de 3,5 p. 100 du rayonnement global incident

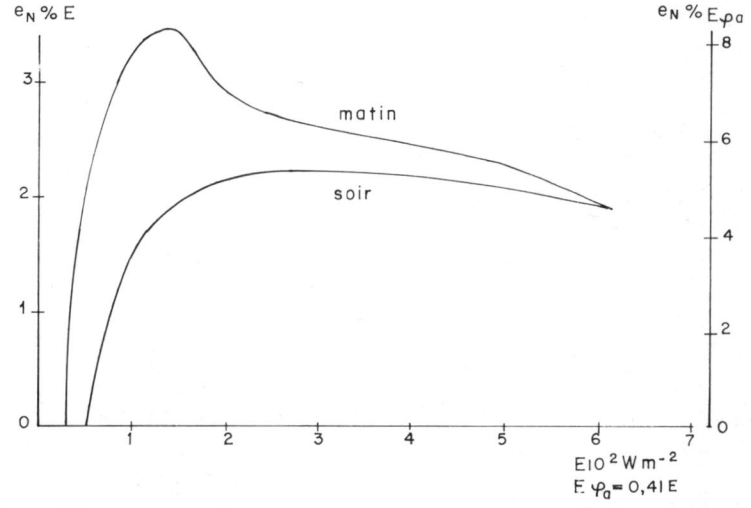


FIG. 6. — *Rendement énergétique de la photosynthèse nette* (e_N) *en* p. 100 *du rayonnement global* (E) *et en* p. 100 *du rayonnement utile dans la photosynthèse absorbé* ($E\varphi_a$).

lorsque ce dernier traverse le niveau de 100 à 150 W m^{-2} le matin, il décline ensuite de façon continue puis marque un long palier vers 2 p. 100 en cours d'après-midi avant de s'effondrer en fin de soirée, à l'approche du point de compensation pour la lumière.

Sur le nycthémère, le rendement net de ce couvert très dense et pour une belle journée de 14 h d'ensoleillement est de 1,7 p. 100 du bilan diurne d'énergie incidente (tabl. 2).

Ces rendements exprimés par rapport à l'énergie utile à la photosynthèse (400-700 mm) absorbée ($E\varphi a = 0{,}45\ E \times 0{,}9$) seraient deux fois et demi plus élevés.

TABLEAU 2

Composantes du rendement énergétique de la photosynthèse sur 24 h (25/8/74)

	ΣP_N entre E_{c1} et E_{c2}	ΣR 0 h à $E_{c1} + E_{c2}$ à 24 h	$\Sigma P_N - R$	$\frac{\Sigma R \text{ p. } 100}{\Sigma P_N}$	ΣE (5 h à 19 h)	$\frac{P_N \text{ p. } 100}{\Sigma E}$	$\frac{(\Sigma P_N - \Sigma R) \text{ p. } 100}{\Sigma E}$
en g CO_2 m^{-2}	34,34	7,23	27,11	21		2,17	1,71
en mega joule	0,390	0,082	0,309		17,945		

E_c = point de compensation pour la lumière (1 : matin, 2 : soir).

2. — *Evolution en cours de saison*

Macroscopiquement, aucun changement dans l'aspect de la végétation n'est décelable avant le 5 novembre, date à laquelle se produit un début de jaunissement.

L'évolution du comportement photosynthétique au cours du temps est caractérisée de la façon suivante (fig. 7) :

Nous signalerons tout d'abord que pour tous les critères retenus, efficience maximale (α), photosynthèse à 350 W m^{-2} ($P_{N_{350}}$), respiration à l'obscurité (R_0) et point de compensation pour la lumière (E_c), il existe jusqu'au 20 septembre deux valeurs distinctes signalant les deux courbes de réponse à la lumière décrites pour la journée prise comme exemple ; le phénomène disparaît au-delà de cette date.

$P_{N_{350}}$ et α restent sensiblement constants durant cette période alors que R_0 et E_c diminuent peu à peu ; la variation de R_0 entraîne d'ailleurs nécessairement celle de E_c à α constant. Nous noterons que sa variation suit le déclin de la durée du jour donc de la photosynthèse nette globale diurne.

A partir du 5 octobre se dessine une chute assez rapide de α et $P_{N_{350}}$. Le 5 novembre au premier signe de jaunissement des feuilles, la courbe de réponse à la lumière est déjà extrêmement aplatie ($\alpha = 1\ \mu g\ CO_2\ J^{-1}$, $P_{N_{350}} = 4$ mg CO_2 mn^{-1}, soit 1/10 de la $P_{N_{350}}$ en août et septembre). R_0 continue à décroître, E_c se stabilise sauf une remontée brutale au dernier contrôle ; il se produit d'abord une compensation entre les variations de α et R_0 puis E_c subit tout le poids de la valeur très basse de α.

En résumé, les caractéristiques du fonctionnement photosynthétique restent stables jusqu'au début du mois d'octobre puis déclinent rapidement en 1 mois.

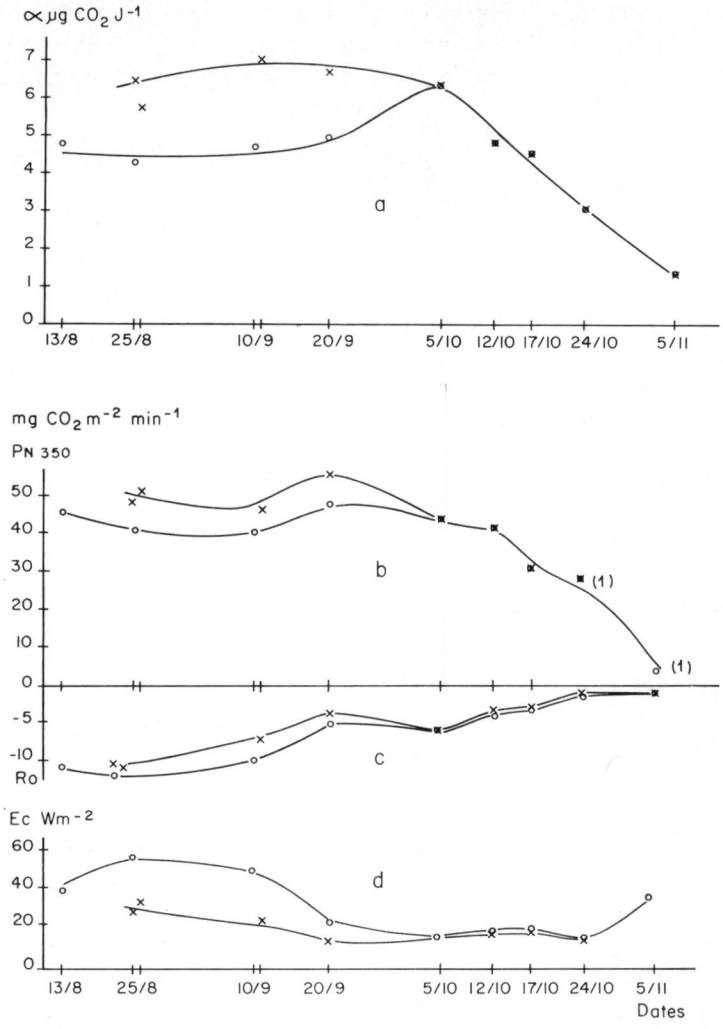


FIG. 7. — *Evolution de quelques caractéristiques des courbes de réponse à la lumière en cours de saison.*

a) Efficience maximale (x lever, o coucher du soleil).
b) pour un éclairement de 350 W m^{-2} (x le matin, o le soir) (1) valeur extrapolée.
c) P_N pour un éclairement nul (x fin, o début de nuit).
d) Point de compensation pour la lumière (E pour $P_N = 0$).

3. — *Comparaison avec un couvert prairial (Fétuque élevée)*

Le couvert créé présente une certaine analogie de hauteur et de densité avec celui réalisé par une prairie de Fétuque élevée. Les structures du feuillage sont assurément très différentes, plutôt étalées dans un cas, érigées dans l'autre; il nous paraît cependant intéressant d'établir une comparaison entre eux, ne serait-ce que par absence de référence à ces échelles de temps et d'espace.

Nous avons pris les valeurs moyennes des différentes caractéristiques photosyn-

thétiques sur la période de relative stabilité en août et septembre, pour le Noyer, et les valeurs moyennes établies sur Fétuque durant 18 journées précédant une coupe (27/4 au 5/5/1974) ; ce couvert a d'ailleurs révélé comme le couvert de noyers, deux courbes de réponses journalières à l'éclairement.

TABLEAU 3

Comparaison des comportements photosynthétiques d'un couvert dense de noyers issus de semis et d'une prairie de graminée (Fétuque élevée)

		Noyers	Fétuque	Noyer/Fétuque
* Efficience photosynthétique maximale α ($\mu g\ CO_2\ J^{-1}$)	lever	6,46	5,31	1,22
	coucher	4,98	4,28	1,16
* R_0 ($mg\ CO_2\ m^{-2}\ mn^{-1}$)	fin de nuit	— 7,7	— 8,4	0,91
	début de nuit	— 8,8	— 9,9	0,88
* P_{N350} ($mg\ CO_2\ m^{-2}\ mn^{-1}$)	matin	49,2	59,6	0,82
	soir	43,8	55,4	0,79
* Point de compensation pour la lumière ($W\ m^{-2}$)	matin	20,9	24,4	0,85
	soir	33,5	38,3	0,87
Bilan net sur 24 h ($mg\ CO_2\ m^{-2}$) Σ E $\neq$ 18 MJ		27,1	37,5	0,72

* Moyenne des comportements entre le 13/8 et le 5/10 pour les noyers.
— — sur 18 journées entre le 27/4 et le 15/5 pour la Fétuque.

La confrontation (tabl. 3) ne révèle pas de différences majeures, si ce n'est au niveau de P_{N350} où la réponse de la prairie est de 20 p. 100 supérieure à celle des noyers. Ceci, joint à une efficience maximale de la lumière légèrement plus faible, témoigne d'une meilleure adaptation aux forts éclairements. La prépondérance de ces derniers dans les bilans d'énergie et de photosynthèse à l'échelle d'une journée ensoleillée, restreint le bilan net de CO_2 du Noyer à 70 p. 100 de celui de la prairie.

Discussion et Conclusion

Dans cette première étape de notre travail, nous ne pouvons que noter les quelques singularités de comportement photosynthétique journalier et saisonnier du couvert particulier réalisé. La seule comparaison établie situe les possibilités d'un feuillage compact de Noyer au voisinage de celles d'un feuillage également très dense de graminées ; les ordres de grandeur sont voisins ; cependant les différences de comportement aux faibles et surtout aux forts éclairements correspondraient assez bien à classer le Noyer derrière la Fétuque dans le groupe des « plantes de lumière » (Costes, 1975) ; elles s'expliquent aussi, de façon peut-être moins conventionnelle, par les différences de structures existant entre les deux couverts (Chartier,1975). Nous nous proposons d'analyser ce facteur dans les étapes ultérieures de notre travail.

En ce qui concerne les dynamiques journalières, l'existence de deux courbes de réponse à la lumière n'est pas un phénomène particulier au couvert du Noyer ; ce

comportement signalé ici pour la Fétuque élevée a été également observé sur Tournesol et Maïs, il pose un problème d'ordre général.

Le phénomène se déclenche par journée ensoleillée avec un éclairement régulièrement croissant jusqu'à des intensités égales et supérieures à 550 W m^{-2}, il est ensuite irréversiblement acquis à l'échelle de la journée. Par temps couvert avec éclaircies brèves permettant des intensités fortes pendant un temps court, il n'apparaît plus ; les dynamiques journalières d'éclairement disponibles au cours de cet essai ne se prêtent pas à cette dernière constatation souvent vérifiée dans d'autres circonstances, cependant les contrôles (fig. 7 et tabl. 4) permettent d'affirmer qu'en dessous de certains seuils d'énergie incidente à l'échelle instantanée et journalière, il n'existe plus aucune « anomalie » dans les liaisons $P_N = f(E)$; le ou les mécanismes en jeu semblent ainsi en liaison directe ou indirecte avec le complexe *durée* $\times$ *intensité* de la lumière. Plusieurs hypothèses sont envisageables.

TABLEAU 4

Eclairement des différentes journées de contrôle
Σ E : énergie reçue dans la journée (MJ j^{-1}) ; E max. : flux maximum (W m^{-2})

Date	25/8	10/9	20/9	5/10	12/10	17/10	24/10	5/11
Σ E	17,9	13,2	11,0	5,6	4,3	7,1	1,9	1,8
E max.	615	662	575	417	370	386	96	193

1. — *Actions directes de la lumière*

a) *Modification de la photorespiration.*

La même intensité lumineuse entraînerait en deux périodes distinctes de la journée des niveaux photorespiratoires différents, liés au passé photosynthétique ou à un changement dans l'environnement ; à notre connaissance, la première liaison n'a jusqu'alors jamais été envisagée ; le deuxième type de liaison sera discuté avec les actions indirectes de la lumière.

b) *Changement dans la répartition des chloroplastes.*

On a depuis longtemps reconnu l'action de la lumière sur leur organisation à l'intérieur des tissus chlorophylliens ; ce phénomène adaptatif entraîne sans doute une diminution de la lumière captée par les étages supérieurs du feuillage mais sans nécessairement modifier le bilan de lumière efficace absorbée par l'ensemble du couvert ; les modifications de la répartition d'énergie dans la masse seraient plutôt favorables. On ne dispose d'aucune information sur la dynamique de ces déplacements pour juger de la compatibilité avec l'évolution de $P_N(E)$.

c) On peut élargir cette notion d'adaptation à l'éclairement en remarquant que les paramètres de l'expression de la photosynthèse brute (P) se déplacent en cours de journée de façon tout à fait cohérente avec le passage progressif du type « plante d'ombre » (efficience maximale α élevée, P_{max} théorique bas) vers un type « plante de lumière » qui s'accuse en début d'après-midi (α faible, P_{max} fort), pour retrouver

imparfaitement le type ombre en fin d'après-midi (tabl. 1) ; cette modélisation sommaire permet un excellent ajustement, mais les tendances qui apparaissent au travers des quantifications qu'elle rend possibles ne sont en rien explicatives et demandent une analyse approfondie des mécanismes recouverts à cette échelle par ces deux paramètres (Chartier, 1970).

2. — *Actions indirectes de la lumière*

a) *Variation de la température du couvert et respiration.*

En condition naturelle ouverte, l'évolution de l'éclairement par temps clair entraîne l'évolution de la température ambiante et celle de la masse du couvert, qui peut alors être corrélée avec une augmentation des processus respiratoires (respiration « sombre » et photorespiration). Dans nos conditions expérimentales, la température ambiante est maîtrisée et constante. Nous avons vérifié qu'en toute condition d'éclairement, la température des feuilles, en particulier celle des feuilles exposées à la lumière, était étroitement assujettie (pratiquement égale) à la température d'environnement.

b) *Variation des équilibres de transfert hydrique et régulation stomatique.*

La possibilité de dépression de photosynthèse en milieu et en fin de journée a été maintes fois signalée et mise en relation avec un déséquilibre hydrique temporaire et la régulation stomatique hydroactive concomitante (Bouchet *et al.*, 1963 ; Catsky, Chartier et Djavanchir, 1973). Cependant ce mécanisme devrait se signaler par un décrochement de l'évapotranspiration et ce décrochement n'est pas perceptible ici (fig. 3). S'il est vrai qu'une éventuelle variation de résistance aux transferts peut être normalement compensée au niveau du flux de vapeur d'eau par une élévation des températures de surface, cette variation thermique reste cependant peu probable dans nos conditions de régulation. Cette hypothèse ne peut néanmoins être rejetée à défaut de mesure directe de résistance stomatique.

c) *Action du bilan photosynthétique passé sur la photosynthèse actuelle.*

Dans cette hypothèse, l'accumulation des produits formés par la photosynthèse avant l'instant considéré et fonction essentiellement du déroulement de l'éclairement, agit en rétroaction négative sur la photosynthèse de cet instant (Bourdu, 1975 ; Bonnemain, 1975) ; la vitesse d'élimination par transfert ou transformation serait insuffisante ; d'autre part, la dépense d'énergie nécessaire à ces transferts ou transformations peut en terme ultime modifier le bilan photosynthétique net instantané. Ces deux mécanismes correspondent assez bien au déroulement du phénomène observé, puisque à éclairement identique le passé photosynthétique est plus élevé en cours d'après-midi.

Cette discussion n'apporte aucun élément décisif d'explication. Nous retiendrons cependant comme les plus probables, compte tenu du contexte expérimental qui minimise l'action de la température, d'une part, l'intervention de mécanismes (inconnus) entraînant l'évolution adaptative de la photosynthèse au déroulement de l'éclairement, et d'autre part, l'action négative du passé photosynthétique sur l'activité des sites de photosynthèse.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

The photosynthetic behaviour of walnut (Juglans regia L.). *First observations on a homogeneous canopy obtained from a dense sowing*

As part of a study of the influence of tree structure on its photosynthesis, a first observation, in large assimilation chambers, showed behaviour similar to that of a grass canopy with, however, a tendency to lower efficiency at high light intensities.

The relation : gross photosynthesis-light intensity for the canopy can be formulated according to a model tested for single leaves.

Light saturation apparently does not occur but there is, during the morning of very sunny days, deviation of a first equation $P_N = f(E)$ (morning), to a second, much less efficient equation. The causes of this double light response curve, not limited only to walnut, are discussed.

The canopy, at full development, retains a constant photosynthetic capacity for about two months. Then this capacity declines, reaching 1/10th of its former value after one month, when the first signs of leaf yellowing occur.

Zusammenfassung

Photosynthetisches verhalten des nussbaums (Juglans regia). *Erste beobachtungen über eine ununterbrochene aus sehr dichten sämlingen erzielte pflanzendecke*

Im Rahmen einer Untersuchung des Einflusses der Baumstruktur auf die Photosynthese zeigt die erste Untersuchung in grössen Photosyntheseraümen einer dichten Decke von jungen Nussbaümen ein demjenigem einer Wiesendecke ähnliches Verhalten mit doch einer Tendenz zu einer schwacheren Leistungsfähigkeit im Falle starker Belichtung.

Der Zusammenhang zwischen der Rohphotosynthese und dem Licht zur Höhe der Decke kann auf das für das Blatt erprobte Modell gebracht werden.

Keine Lichtsättigung ist beobachtet, aber vielmehr eine Abweichung vormittags an sehr sonnigen Tagen von einem ersten Morgenfunktion $P_N = f(E)$ zu einen zweiten deutlich weniger leistungsfähigen Funktion. Die Ursachen dieser doppelte Kurve der Reaktion auf das Licht, die ubrigens für diese Pflanze nicht eigentümlich, sind erlaütert.

Die Pflanzendecke, die ihre volle Entwicklung erreicht hat, bewährt eine konstante photosynthetische Leistungsfähigkeit während beinahe zwei Monate, danach sinkt diese Leistungsfähigkeit, un 1/10 des vorherigen Werts innerhalb ein Monat am ersten Zeichen des Laubvergilbens zu erreichen.

РЕЗЮМЕ

Фотосинтетическое поведение ореха (Juglans regia).
Первые наблюдения над непрерывным покровом, полученным от густого посева

М. РОБЕЛЕН, Ж. К. МОЖЕ.
при техническом сотрудничестве М. МАРТИНЬЯК.

В кадре изучения влияния структуры дерева на его фотосинтетическую активность, первые наблюдения над фотосинтезом компактного покрова молодых ореховых деревьев, проведенные на крупных площадях, показали, что поведение этого дерева в данных условиях аналогично его поведению в условиях лугового покрова, но с тенденцией к ослаблению эффективности, в случае интенсивного освещения.

Связь валовой фотосинтез-свет на уровне покрова можно сформулировать по модели, испытанной на уровне листа.

Световой насыщенности не наблюдается, но проявляется скорее отклонение первой утренней функции $P_N = f(E)$ в течении утра очень солнечного дня, в сторону второй функции, гораздо менее эффективной. Обсуждаются причины этой двойной кривой ответа на свет, являющейся особенностью этого растения.

По достижении полного ее развития, фотосинтетическая способность покрова остается на постоянном уровне в течении около 2-х месяцев, и, затем, ослабевает до 1/10 своего прежнего значения, во время появления первых признаков пожелтения листвы.

Références bibliographiques

BONNEMAIN J. L., 1975. Transport et distribution des produits de la photosynthèse p. 165, in *Photosynthèse et Production végétale*, C. COSTES, Ed. Gauthier-Villars.

BOUCHET R. J., de PARCEVAUX S., ARNOUX J., 1963. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle. *L'Eau et la Production végétale*, INRA Paris, 233-241.

BOURDU R., 1975. Structure et développement des chloroplastes. *Photosynthèse et Production végétale*, p. 3.

CATSKY J., CHARTIER Ph., DJAVANCHIR A., 1973. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de Maïs. IV. — Evolution diurne de la résistance stomatique et du déficit de saturation des feuilles, conséquences sur la fixation du CO_2. *Ann. agron.*, **24** (3), 287-305.

CHARTIER Ph., 1966. Etude théorique de l'assimilation brute de la feuille. *Ann. Physiol. vég.*, **7** (3), 167-195.

CHARTIER Ph., HALLAIRE M., 1967. Photosynthèse de la feuille et du couvert végétal : influence particulière de l'alimentation hydrique. *C. R. International Soil Water Symposium*, Prague, 51-72.

CHARTIER Ph., 1975. L'assimilation du CO_2 à l'échelle de la feuille et à celle de la culture. *Photosynthèse et Production végétale*, 171-178.

COSTES C., 1975. Processus photochimiques et conversion énergétique de la lumière dans la feuille. *Photosynthèse et Production végétale*, p. 35.

GARAVEL L., 1959. *La culture du Noyer*, pp. 129-130. Ed. Baillère.

ROBELIN M., 1972. Etude du bilan gazeux au niveau des couverts végétaux. 5e *Conférence Internationale sur le Tournesol*. Ed. CETIOM, p. 19-28.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 599-635.

Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen Cas des cultures de céréales en sec au Nord du Maroc

J. FENECH * et F. PAPY **

avec la collaboration technique de Danielle BREIL **, A. ABOUAFS *, A. ERRADI ** et A. KHOUYA *

* *Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès (Maroc)*
** *Institut Agronomique et Vétérinaire, Hassan-II,* B. P. 704, *Rabat (Maroc)*

Résumé

Des enquêtes au champ dans le Nord du Maroc ont montré que les pourcentages de levée étaient souvent très faibles. Une analyse des caractéristiques climatiques des automnes méditerranéens met en évidence la violence des pluies et des alternances de séquences pluvieuses et sèches, dont on peut penser *a priori* que ce ne sont pas des conditions favorables aux levées. Mais ne peut-on toutefois améliorer, par les techniques, les pourcentages de levée ?

Pour répondre à cette question, nous avons mis en place deux séries d'essais : des essais modélisés qui ont l'avantage d'être explicatifs et des essais en champ où l'on met en comparaison différentes techniques (classiques et améliorées) dans différentes conditions climatiques.

Les essais modélisés montrent que, lorsqu'il existe dans le profil un fort gradient hydrique, on observe une profondeur optimum de semis qui est un compromis entre les exigences de germination et d'émergence. Les essais en plein champ montrent, dans toutes les séquences climatiques testées, la supériorité du semoir sur les différents modes de semis à la volée. Mais le semoir exige des horizons de surface déjà bien affinés. Dans les semis à la volée, le pourcentage de levée ne dépasse guère 50 p. 100. Ce sont souvent les modes de semis les plus profonds (enfouissement des grains à la petite charrue) qui donnent les levées les meilleures et les moins dépendantes des conditions climatiques.

On discute la cohérence de ces résultats et leurs applications pratiques.

I. — Introduction

Des enquêtes culturales réalisées au champ, dans diverses zones des plaines atlantiques du Nord du Maroc (Bourgeois, 1975 ; Anechoum, 1975), montrent que le peuplement épis des champs de blé reste le plus souvent inférieur à 300 épis/m². Or, des résultats d'essais attestent que les meilleurs rendements ne sont obtenus que pour des valeurs égales ou supérieures à celles-ci. Comme dans les conditions de cultures courantes et avec les variétés actuelles, le tallage-épi est en général faible, il importe, pour obtenir un peuplement d'épis suffisant, d'avoir, à la levée, assez de plantes par mètre carré.

Mais les enquêtes précédemment citées montrent que, même avec des semences saines et ayant une bonne faculté germinative, les levées sont souvent défectueuses (Bourgeois, 1975) et très variables selon les séquences pluviométriques pendant la période semis-levée (Ifri, 1975) ainsi que selon les techniques pratiquées (Anechoum, 1975).

Les conditions climatiques, en particulier pluviométriques, régnant avant et après le semis, les relations sol-semence qui dépendent des états structuraux, eux-mêmes liés au climat et aux outils, interagissent sur la germination et l'émergence des plantules (Boiffin et Sebillotte, 1975). Nous nous proposons d'analyser ces mécanismes d'interaction dans les conditions de cultures céréalières des plaines atlantiques du Nord du Maroc. Ces conditions résultent :

— des caractéristiques climatiques de l'automne,
— des techniques pratiquées.

Mais les connaissances théoriques dont on dispose sur les mécanismes susceptibles de jouer sur la levée, l'analyse des caractéristiques climatiques et des itinéraires tech-

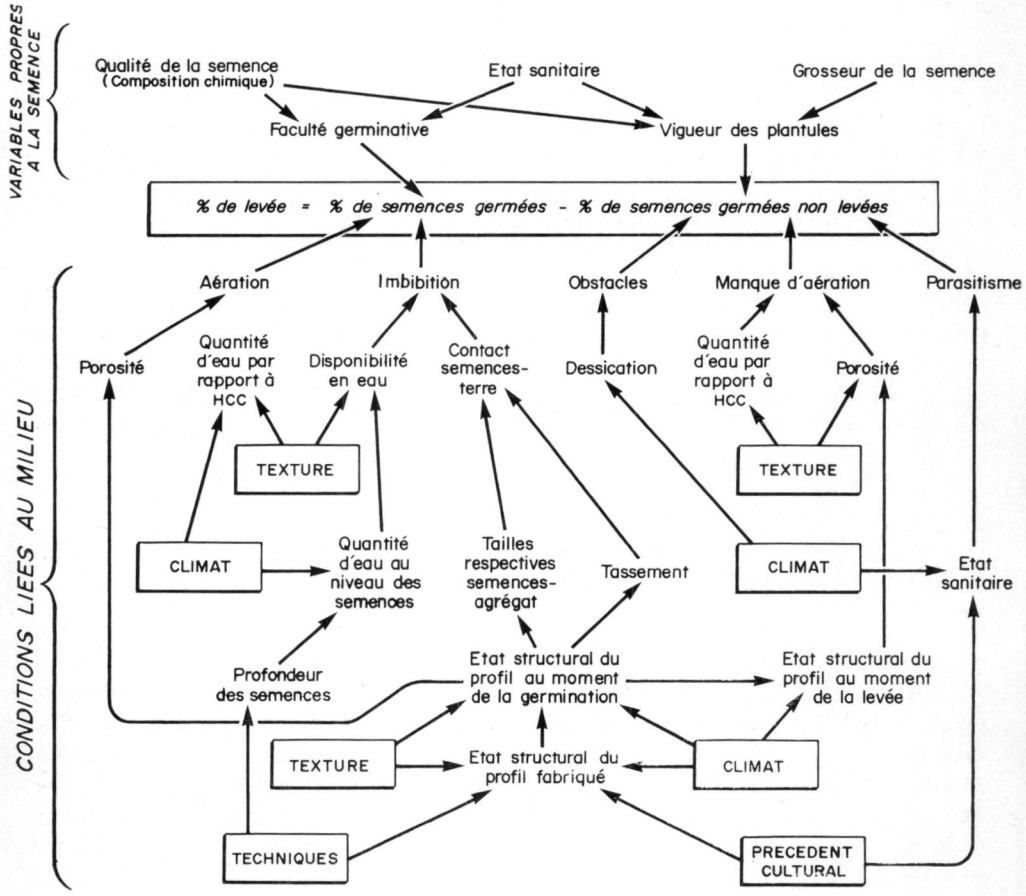


FIG. 1. — *Schéma des relations sol-climat-semences influençant la levée.*

niques (1) les plus usités, permettent de se faire une idée sur la fréquence avec laquelle on rencontre certains types de lits de semence caractérisés par :

— les états de la structure,
— les profils hydriques,
— le positionnement des graines.

1. — *Le graphe de la figure* 1 représente l'ensemble des mécanismes qui peuvent influencer la levée. La germination est distinguée de l'émergence puisque nous écrivons :

p. 100 de levée = p. 100 de graines germées — p. 100 de graines germées non levées.

L'influence de la température n'est pas prise en compte. Cette dernière joue surtout sur la vitesse des phénomènes et n'intervient sur le pourcentage de levée que si des conditions défavorables (surtout liées au parasitisme) provoquent la mort des plantules germées. Quoi qu'il en soit, nous retenons l'hypothèse que, dans les conditions du climat méditerranéen, la température automnale n'est pas une condition limitant la levée.

2. — *Les caractéristiques climatiques* les plus déterminantes sur la levée concernent ainsi la pluviométrie. Pour avoir une idée de la pluviométrie automnale, nous avons utilisé les données du poste météorologique de Meknès-Aviation de 1950 à 1974. Si les valeurs fréquentielles données dans les tableaux 1 et 2 ne sont valables que pour la région de Meknès, les caractéristiques générales du climat concernent l'ensemble des plaines atlantiques du Nord du Maroc. On peut les résumer comme suit :

— l'arrivée des pluies est irrégulière (tabl. 1) ;
— les chutes de pluies peuvent être violentes (tabl. 2) : 20 années sur 100, on a enregistré, en décembre, au moins un jour à intensité pluviométrique supérieure ou égale à 40 mm/j ;
— les périodes pluvieuses sont *entrecoupées de longues séquences de beau temps*, dont la fréquence d'apparition diminue au fur et à mesure que l'on avance en saison.

TABLEAU 1

Fréquence des cas où sont tombés, dans une décade donnée, les 20 premiers mm *de la campagne agricole (Meknès-Aviation,* 1950-1974)

Septembre			Octobre			Novembre			Décembre
1er déc.	2e déc.	3e déc.	1er déc.	2e déc.	3e déc.	1er déc.	2e déc.	3e déc.	1er décade
0 p. 100	12 p. 100	12 p. 100	12 p. 100	24 p. 100	4 p. 100	16 p. 100	12 p. 100	4 p. 100	4 p. 100

(1) La notion d'itinéraire technique est développée par Sebillotte, 1974.

TABLEAU 2

Fréquence mensuelle des cas où l'on enregistre au moins une fois une pluie supérieure ou égale à 30 mm *et* 40 mm/jour

30 mm/j				40 mm/j			
Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
4 p. 100	20 p. 100	28 p. 100	28 p. 100	4 p. 100	8 p. 100	16 p. 100	20 p. 100

L'irrégularité d'arrivée des pluies n'influe pas de façon directe sur la levée (1), mais la *violence des pluies*, plus grande qu'en climat tempéré, peut avoir des conséquences diverses selon les terrains (texture et topographie) ; sur une pente, cela peut se traduire par une réduction de l'infiltration de l'eau et un ruissellement important qui peut entraîner éléments terreux et semences. Lorsque l'infiltration de l'eau dans le sol est lente, que la topographie générale est plane, que l'évacuation de l'eau de surface est défectueuse, la violence des pluies peut créer des engorgements temporaires qui favorisent la pourriture des semences. Enfin, on sait que l'effet de pluies intenses sur la dégradation de la structure, s'ajoute à l'effet propre de l'humidité (Boiffin et Sebillotte, 1975). L'état structural obtenu peut, après dessiccation, constituer un obstacle à la sortie des plantules.

Les longues périodes de dessiccation du sol se traduisent par l'existence de forts gradients hydriques ; aussi, pour de faibles différences de profondeur, la semence peut se trouver dans des conditions d'imbibition très différentes et les périodes de sécheresse peuvent entraîner la mort de graines ayant germé.

3. — *Les techniques de préparation des terres et les semis* sont encore au Maroc très rudimentaires.

Sur les quelque 3 900 000 ha de blé et d'orge, la préparation à traction animale est dominante et, sauf dans les sols légers où la petite charrue à versoir se répand, c'est l'araire le principal outil employé. Les premières façons sont conditionnées par l'arrivée des pluies en automne. Selon l'état structural du profil après la culture précédente, selon le temps disponible, qui est d'autant plus réduit que les premières pluies sont tardives, l'agriculteur fait un ou deux passages croisés d'araire. Le semis a toujours lieu à la volée avant le dernier passage d'outil qui recouvre la semence. En traction animale, on n'utilise jamais le semoir en ligne.

La traction mécanique cependant se généralise très vite. D'après une enquête récente de la Division des Affaires économiques (1976), on peut estimer que pour l'ensemble du Maroc, 42 p. 100 des superficies de céréales sont préparées, au moins partiellement, à la traction mécanique. Dans les plaines atlantiques du Nord du Maroc, où les surfaces à forte pente sont rares, et où domine la grande exploitation, les pourcentages de surfaces mécanisées sont nettement supérieurs à la moyenne nationale.

(1) Si nous avons mentionné ici cette caractéristique du climat méditerranéen, c'est qu'elle influe de façon indirecte sur les conditions de levée. Car si l'on décide de ne pas dépasser une certaine date limite pour semer de façon à ne pas trop décaler le cycle vers l'été, on peut, selon l'année, semer en sec ou après pluie, ce qui différencie nettement les situations.

Le principal avantage que les agriculteurs marocains voient dans la traction mécanique est la vitesse. C'est grâce à elle que l'on peut ravailler la terre juste après la récolte du précédent cultural avant que la sécheresse estivale la rende trop cohérente. Cette pratique facilite la reprise des terres à l'automne. C'est également la vitesse de travail qui permet de faire plusieurs façons de préparation en automne. C'est pour aller vite avec des tracteurs de puissance moyenne que les agriculteurs marocains ont adopté si unanimement le pulvériseur à disques ou cover-crop, outil, au demeurant, d'un entretien facile.

Aussi les itinéraires techniques traditionnels du type : araire, semis à la volée, araire, sont remplacés par cover-crop, semis à la volée, cover-crop, réalisés à l'automne, le plus souvent après les premières pluies et précédés ou non selon les cas d'un travail au cover-crop réalisé au printemps, juste après la récolte précédente.

L'usage des semoirs en ligne est extrêmement rare et ne se généralise que très lentement. Des outils de préparation du sol en conditions sèches comme les outils à dents ou les rouleaux sont rares voire inexistants.

La gamme réduite d'outils utilisés conduit à adopter des itinéraires techniques assez standardisés, quels que soient les états structuraux et hydriques de départ. Il s'ensuit que les lits de semences sont souvent défectueux : souvent trop creux, ils sont parfois constitués de terre très fine (ce qui augmente leur sensibilité à la battance), parfois de grosses mottes (ce qui réduit les possibilités d'imbibition des semences). Dans tous les cas les semences sont mises en place dans le profil sur une large gamme de profondeur.

Nous avons vu plus haut comment les séquences climatiques des automnes méditerranéens induisent des états de profils défavorables à la levée : gradient hydrique élevé, risque de battance en surface dû à la violence des pluies... La faible gamme d'outils utilisés ne permet pas de réaliser des lits de semences assurant, de façon régulière, de bonnes levées. Comment améliorer les techniques de préparation des terres et des semis pour assurer de bonnes levées dans les conditions climatiques décrites ? C'est ce à quoi nous avons cherché à répondre en nous posant les questions suivantes :

— Quels sont, dans les différents types de séquences climatiques rencontrées, les états de lits de semences qui permettent une bonne levée ?

— Par quels itinéraires techniques simples y aboutir ?

II. — Matériel et méthode

1. — *Démarche générale*

Puisque nous pressentons le rôle déterminant des séquences pluviométriques sur la réussite de la levée, nous avons cherché à comparer des techniques fabriquant des lits de semence ([1]) nettement différenciés dans différentes séquences. Dans un tel

([1]) Nous entendons par lit de semence l'ensemble : état structural des horizons où se localisent les semences et position des semences dans ces horizons.

type d'essai, ainsi que le note Sebillotte (1975), pour comprendre les mécanismes d'action, il faut remplacer les liaisons du type :

Techniques ⟶ p. 100 de levée

par des liaisons intermédiaires :

Cela suppose que l'on réalise un contrôle suivi des états structuraux et hydriques des lits de semence au cours du temps, ce que nous avons réalisé dans les essais dits en plein champ. Le contrôle des états des lits de semence est fait *a posteriori* et non *a priori*, ce qui ne serait pas grave si l'on arrivait à obtenir des états de lits de semences qui ne se distinguent que par un seul caractère (état structural ou position des semences), mais ce n'est pas le cas. Il en résulte des difficultés de principe pour expliquer les phénomènes. Par ailleurs, il est assez difficile, en plein champ, surtout dans le cas de semis à la volée, de donner des valeurs exactes de levée, étant donné qu'on ne contrôle pas de façon précise la quantité semée sur une petite surface (1).

D'où l'idée de joindre aux essais en plein champ des *essais modélisés* en pots ou sur petites placettes dans lesquels on fabrique les lits de semence en disposant comme on l'entend des semences et des agrégats de terre de granulométrie déterminée. De tels dispositifs permettent mieux d'expliquer les phénomènes. Mais les essais modélisés présentent également un inconvénient de principe : on ne peut y reproduire toutes les conditions de séquences climatiques qui existent dans les essais au champ car, dans ces essais, on ne peut préparer les lits de semences qu'à sec ; ces essais ne peuvent donc être comparés à des essais en plein champ avec semis en sol humide.

Les deux types d'essais se complètent :

— Les essais modélisés sont plus analytiques (dans l'un d'eux, où l'on a fait un dépotage après la levée, on a même pu distinguer les résultats de germination des résultats d'emergence), mais les résultats qu'on en obtient sont moins généralisables.

— Les essais en plein champ permettent d'étudier la gamme naturelle des phénomènes mais sont moins explicatifs même lorsqu'on prend soin de contrôler les liaisons intermédiaires.

2. — *Les essais modélisés* (Em)

Nous avons réalisé deux essais : Em_1 et Em_2.

Em_1 : Le but de cet essai est l'analyse de l'interaction taille des agrégats-profondeur de semence-séquence climatique. L'essai a été réalisé avec une terre de texture argilo-limoneuse à bonne stabilité structurale dont l'humidité à la capacité au champ est de 32 p. 100.

Les parcelles élémentaires sur lesquelles s'appliquent chacun des traitements sont

(1) Il faudrait multiplier les comptages, ce qui augmente beaucoup le travail.

constituées de parallélépipèdes droits à base carrée, à fond ouvert, enfoncés en terre (largeur des côtés : 55 cm, profondeur dans le sol : 25 cm). Dans chacune d'elles, on dispose à la fois les semences (cent graines par parcelle) et les agrégats de terre, secs et tamisés, en combinant de façon factorielle les traitements élémentaires suivants :

- trois structures { fine : agrégats inférieurs à 1,5 mm ; moyenne : agrégats compris entre 2 et 3,15 mm ; grossière : agrégats compris entre 4 et 6,3 mm,
- quatre profondeurs de semis : 2, 4, 6 et 8 cm,
- deux dates de semis donnant deux séquences climatiques nettement distinctes du point de vue de la pluviométrie (voir tabl. 3), mais très semblables quant aux températures de l'air et du sol. Au départ, dans les deux cas, les semis étaient réalisés en sec.

TABLEAU 3

Séquences pluviométriques de l'essai Em_1

Séquence pluviométrique 1	Séquence pluviométrique 2
— Semis en sec suivi 2 j après une petite pluie de 5 mm.	— Semis en sec.
— 50 j sans pluie.	— Pluies continues et peu violentes juste aussitôt après le semis.
— Pluie violente de 30 mm en 1 j.	
— 14 j sans pluie.	
— Reprise des pluies assez continues.	

L'humidité moyenne du sol a été contrôlée aux différentes profondeurs de semis dans des parcelles témoins et on a suivi les différents rythmes de levée.

Dans le cas de cet essai on a laissé les plantes en place jusqu'à la récolte, ce qui n'a pas permis d'observer les plantules germées non émergées.

Em_2 : Les mécanismes étudiés diffèrent-ils selon la texture ?

C'est ce que nous avons essayé de voir dans un deuxième essai modélisé dont le but est d'analyser l'interaction *texture-profondeur des graines-séquence pluviométrique.*

L'essai est réalisé en pots à fond drainant. On combine de façon factorielle les traitements élémentaires suivants :

- trois terres de textures différentes (TIRS : texture argileuse ; DESS : texture limoneuse ; RMEL : texture sableuse),
- trois profondeurs de semis : 2, 5 et 10 cm,
- deux séquences pluviométriques.

Le remplissage des pots est fait avec de la terre sèche tamisée à 2 mm. L'ensemble des pots reçoit 40 mm (en 4 j par petites pluies fines de 2,5 mm) de façon à humecter les semences les plus profondes de la terre argileuse et *a fortiori*, toutes les autres. A partir de cette date, une série de pots n'est plus arrosée et se dessèche par évaporation (régime pluviométrique stoppé), l'autre reçoit une pluviométrie régulière de 2,5 mm par jour (régime pluviométrique permanent) de façon à maintenir l'ensemble des pots à une humidité voisine de l'humidité à la capacité au champ.

Au dépotage on a distingué les plantes non germées, les plantes germées non levées et les plantes levées ; l'on a réalisé des observations sur les obstacles à l'émergence et fait des mesures de densité apparente à l'anneau dans l'horizon de surface.

3. — *Les essais en plein champ* (E)

Les deux essais sont repérés par les symboles E_1 et E_2.

a) *Les conditions des essais.*

Ces essais ont été réalisés dans des terres différentes :

E_1 : terre argilo-sableuse, battante, à faible activité structurale (humidité à la capacité au champ : 27 p. 100) ;

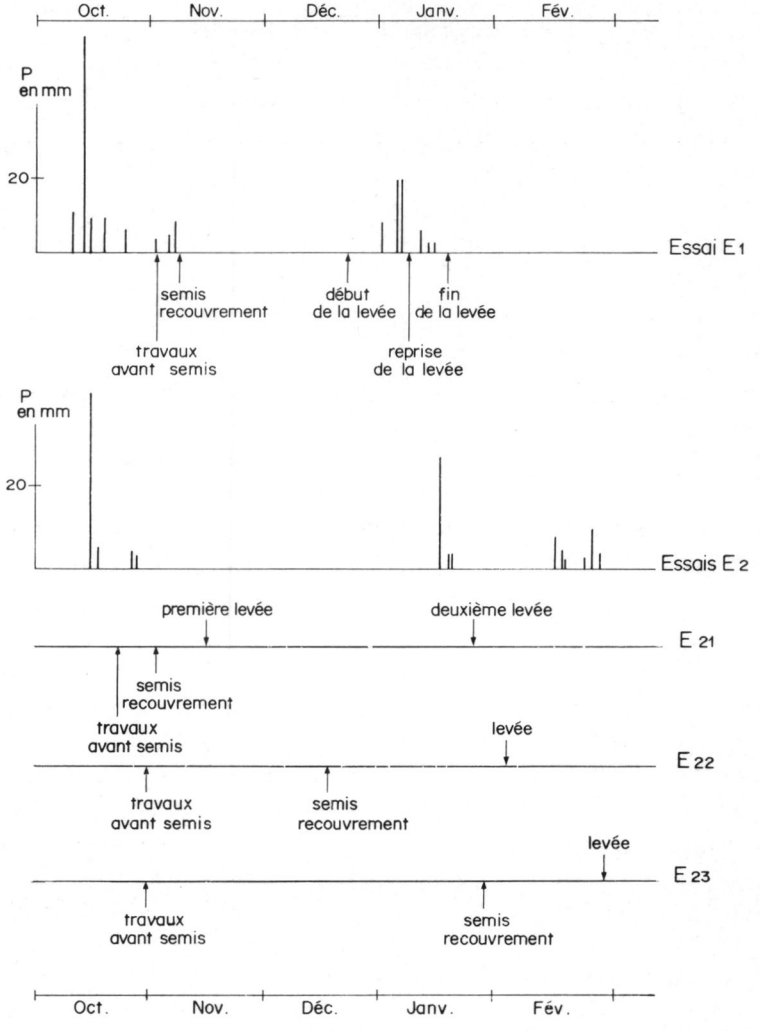


FIG. 2. — *Séquences des travaux et des pluies dans les essais E_1 et E_2.*

E_2 : terre argilo-limoneuse, non battante, à forte activité structurale (terre identique à celle de l'essai Em_1) (humidité à la capacité au champ : 32 p. 100).

Les séquences de pluies par rapport auxquelles sont repérées les dates de travaux et la levée sont présentées dans la figure 2. L'essai E_2 comporte trois dates de semis et donc trois séquences climatiques. Il est divisé en trois situations symbolisées par E_{21}, E_{22}, E_{23}.

b) *Les traitements.*

Les techniques de semis les plus couramment pratiquées au Maroc sont le semis à la volée suivi d'un passage d'araire (traction attelée) ou de cover-crop (traction mécanique). Selon le temps dont disposent les agriculteurs avant cette opération, ils réalisent ou non des travaux préparatoires préalables. Nous avons mis ces séquences d'outils en comparaison avec d'autres techniques de recouvrement des semences et le semis au semoir en ligne (semoir à soc réglé dans tous les cas à 4 cm de profondeur). Nous avons également fait varier les états préalables du sol.

Dans l'essai E_1 n'ont été comparées que des techniques en traction attelée ; dans E_2, on a utilisé la traction mécanique.

Le tableau 4 indique le détail des différents traitements réalisés qui sont repérés par des chiffres arabes. Dans l'essai E_2 ont été combinés des trains d'outils, de façon à modifier de manière factorielle :

— la profondeur du travail préalable du sol,

— le mode de semis,

— le contact graine-semence par le roulage des semis à la Croskillette.

c) *Les observations.*

Les observations portent sur les résultats de levée mais aussi sur les caractéristiques suivantes *des états de lits de semences* :

Etats structuraux et leur évolution.

Dans l'essai E_1 on a suivi l'évolution des états structuraux :

— par des profils culturaux (quatre par traitement) ;

— par des observations de surface (note de la taille modale et des tailles extrêmes des mottes de surface ; note d'enfouissement des mottes ; photographie) ;

— par un tamisage à sec que l'on a pu faire fin novembre dans des horizons suffisamment secs pour que les éléments structuraux soient cohérents et individualisés.

Dans l'essai E_2 où les traitements étaient beaucoup plus nombreux, nous n'avons observé que des profils culturaux.

Etats hydriques.

Des profils hydriques ont été réalisés et répétés dans le temps.

TABLEAU 4

Présentation des techniques utilisées dans les deux essais non modélisés

Référence de l'essai	E_1				E_2															
Façon avant semis	A	—	Pc + H	A	CC						CC + K		ChS + CC						ChS + CC + K	
Mode de semis	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	S	S	V	V	V	V	V	V	S	S
Façon après semis	A	A	H + H	H + H	Pc + H	Pc + H + K	CC	CC + K	H	H + K	—	+ K	Pc + H	Pc + H + K	CC	CC + K	H	H + K	—	+ K
Référence des traitements appliqués	1	2	3	4	5	5′	6	6′	7	7′	8	8′	9	9′	10	10′	11	11′	12	12′

A : Araire ; Pc : petite charrue attelée monosoc (14 kg) ; H : Herse ; CC : Cover-crop ; ChS : charrue à soc tractée ; K : Croskillette ; V : Semis à la volée ; S : semoir à soc.

Position des graines dans le profil.

Mis à part le semis au semoir, qui place les graines à une profondeur réglée d'avance (4 cm $\pm$ 0,5 cm), les autres modes de semis conduisent à une répartition plus étalée des graines dans le profil.

Il est difficile de se faire une image exacte de cette répartition. En effet, si l'on fait un profil juste après semis, on ne voit que très peu de graines ; si on repère les profondeurs des semences à la levée, on n'enregistre pas les profondeurs des plantes n'ayant pas levé, ce qui peut fausser l'image de la réalité. Néanmoins, en répétant plusieurs fois les observations de profondeurs pour un même traitement, nous pensons pouvoir nous faire une bonne idée de la répartition des graines dans le profil, surtout lorsque ces observations se rapportent à une séquence pluviométrique ayant permis à un fort pourcentage de graines de lever.

Résultats de levée et observation des plantes à la levée.

De façon à rendre précis les résultats de levée, on avait semé à la volée la quantité exacte de grain désirée (300 grains/m²) sur une surface de 4 m². On a suivi la levée et réalisé un comptage final dans les différents traitements. Dans la situation E_{22} où il y a eu une levée en deux temps, seule la première levée a été observée avec précision sur les 4 m² semés qui ont été détruits, la deuxième levée n'a pu être observée que sur le reste de la parcelle semée en plein et les résultats sont moins fiables.

Au moment du comptage définitif qui se fait en arrachant les pieds, on a repéré avec précision dans l'essai E_1 la profondeur des graines levées et du plateau de tallage, la longueur et la forme du rhizome, le nombre de talles. Dans l'essai E_2, ces observations n'ont été faites que sur certains traitements.

III. — Résultats

A. — LES ESSAIS MODÉLISÉS.

1. — *Essai* Em_1

Les contrôles d'évolution d'état de profil n'ont porté que sur l'évolution des profils hydriques réalisés sur les parcelles témoins. L'évolution des profils correspondant à la séquence pluviométrique 1 est représentée sur la figure 3. Dans le cas de la séquence pluviométrique 2, cette évolution est plus simple : le taux d'humidité est inférieur à 12 p. 100 sur tout le profil au moment du semis ; puis pendant la phase de pluies régulières et continues, ce taux est égal à 25 p. 100 à 6-8 cm et oscille entre 20 et 25 p. 100 entre 2 et 4 cm.

La levée est caractérisée par son rythme et le taux final de réussite. Dans tous les cas de la séquence pluviométrique 2, le rythme de levée est continu. Dans la séquence pluviométrique 1, on observe une levée après la pluie de 30 mm et, dans certains traitements, une reprise de la levée (cas des structures moyennes et grossières pour les profondeurs de 6 et 8 cm ; cf. fig. 4).

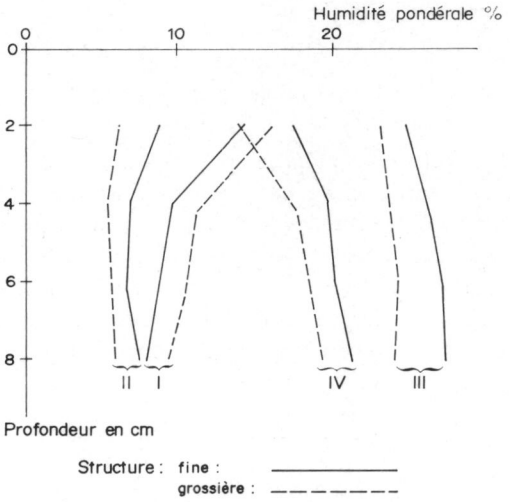


FIG. 3. — *Evolution des profils hydriques dans l'essai* Em_1.

— Le semis a eu lieu en sec :
I : 2 jours après une pluie de 5 mm
II : après 50 jours sans pluie
III : 3 jours après une pluie de 30 mm
IV : 14 jours après la pluie précédente.

— Pour la structure moyenne, les valeurs sont intermédiaires.

Les résultats finaux de levée sont donnés au tableau 5.

TABLEAU 5

p. 100 *de levée des différents traitements de l'essai* Em_1

Profondeur des semences (cm)		Séquence pluviométrique 1					Séquence pluviométrique 2				
		2	4	6	8	Moyenne par structure	2	4	6	8	Moyenne par structure
Structure	fine	84	73	73	28	64,5	98	94	85	79	89
	moyenne	62	70	51	19	50,5	84	94	87	86	87,7
	grossière	46	72	41	21	45,0	92	87	77	65	80,2
Moyenne par profondeur		64	71,7	55	22,7	53,3	91,3	91,7	83	76,5	85,7

La séquence pluviométrique 2 à pluies régulières et continues donne un pourcentage de levée nettement supérieur à la séquence 1 qui se caractérise par de longues périodes sèches après des pluies (pluie fine après semis, non suivie de levée, pluie forte, 50 j après la première). De plus, dans cette dernière séquence, on observe une interaction marquée entre profondeur des semences et taille des agrégats.

— *Pour la profondeur de* 2 cm, l'effet structure est très marqué (84 p. 100 de levée pour la structure fine ; 46 p. 100 pour la structure grossière). Or, c'est pour cette profondeur que la variation d'humidité est la plus forte et que les dessiccations après pluies sont les plus nettes (fig. 3). Un meilleur contact semence-terre obtenu par la structure fine favorise dans ces conditions l'imbibition des semences. Il est à noter cependant que la structure fine est généralement légèrement plus humide que les autres, ce qui joue dans le même sens. Le fait qu'à la reprise des pluies continues, il n'y ait pas eu de reprise de la levée des semences à 2 cm laisse à penser que les semences qui n'ont pas levé sont mortes (1) à la suite d'une germination qui a été stoppée par la dessiccation de surface. Il n'est pas exclu que quelques semences à 2 cm aient commencé à germer après la fine pluie de 5 mm qui a suivi le semis. Nous avons en effet vérifié en laboratoire que, dans ce type de terre, on pouvait obtenir un début de germination à 15 p. 100 d'humidité.

— *Pour la profondeur de semis de* 4 *cm*, le pourcentage de levée est le même pour les trois types de structure. Les humidités sont plus fortes qu'à 2 cm et plus voisines entre elles (17 à 20 p. 100) dans le profil fait 14 j après la forte pluie. A ce taux d'humidité, l'effet taille des agrégats ne joue pas : *une bonne humidification compense l'effet d'un mauvais contact semence-terre.*

— *Pour les profondeurs de* 6 *et* 8 *cm*, on note un effet de la profondeur et de la structure. Comme à ces profondeurs on observe des humidités égales à celles obtenues pour 4 cm (fig. 3) et que, dans de telles conditions, la différence de taille des éléments structuraux ne provoque pas des taux de germination différencié, on peut penser que les effets de la profondeur et de la structure se sont manifestés sur l'émergence de plantules ayant déjà germé et non sur la germination (1).

Que les graines semées profond aient du mal à émerger, cela peut s'expliquer par l'épuisement des réserves, encore qu'une profondeur de 8 cm ne soit pas excessive de ce point de vue (voir les résultats de l'essai Em_2), mais l'effet de la structure ne peut s'expliquer par un épuisement des réserves. Les courbes du rythme de levée (fig. 4) montrent, pour les structures moyennes et grossières, une reprise de la levée 1 à 3 j après la deuxième séquence de pluies ; ce délai est si bref qu'il ne peut être que le fait de semences ayant déjà germé. Ce phénomène incite à penser qu'avant la pluie, l'émergence était arrêtée par un obstacle qui a été levé par l'humidification et qui pourrait donc être lié à la cohésion des horizons de surface dès qu'ils sont quelque peu desséchés. Les semis superficiels, à 2 et 4 cm, n'auraient pas rencontré cet obstacle, les horizons de surface n'ayant pas eu le temps de se dessécher entre la germination et la sortie des plantules.

Dans la structure fine, le pourcentage de levée est nettement supérieur aux autres à profondeur égale et l'on n'observe pas de reprise de levée. Ceci peut s'interpréter par de meilleures conditions, l'émergence de plantules ayant germé. C'est peut-être parce que la structure fine contient plus d'eau que les autres (fig. 3) qu'elle est moins cohérente.

(1) Nous n'avons pu le vérifier puisque nous n'avons pas dépoté.

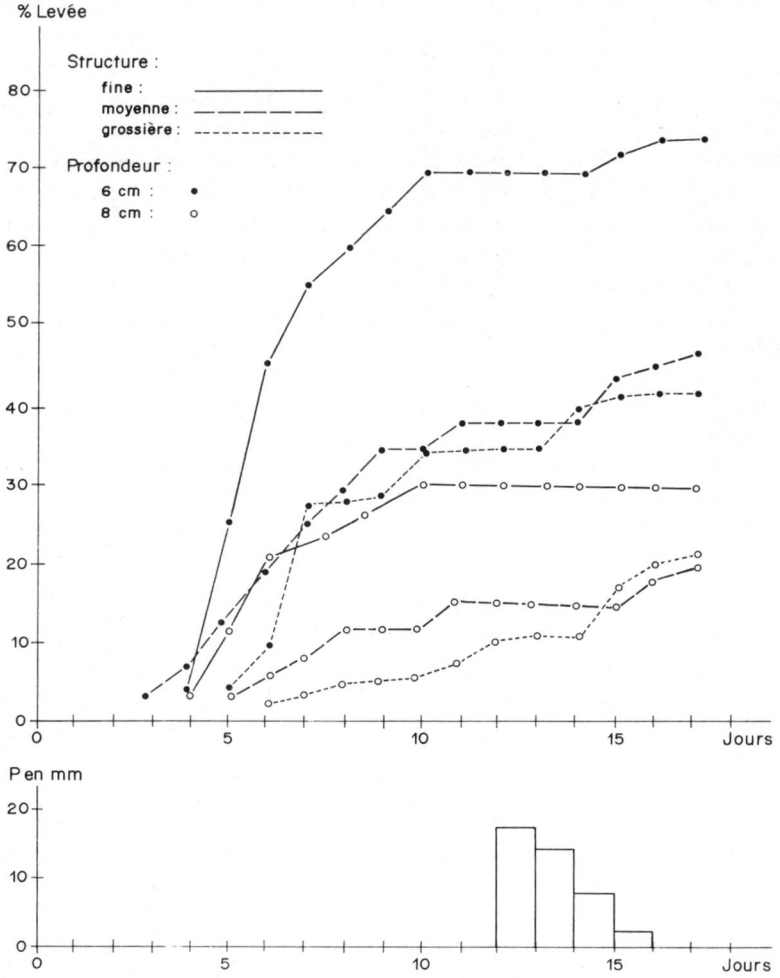


FIG. 4. — *Séquence de pluie à partir du début de la levée et rythme de levée pour les semences à* 6 *et* 8 cm *de profondeur dans l'essai* Em_1

Dans le cas de la deuxième séquence, bien que la réussite soit nettement meilleure que dans le premier cas, on n'obtient le pourcentage de levée du lot de semence mis en test germinatif que pour le traitement : structure fine, profondeur 2 cm. Le taux de réussite de levée diminue avec la profondeur des semis (difficulté d'émergence). L'absence d'interaction montre à nouveau que l'effet structure est peu marqué lorsque les conditions d'humidification du profil sont suffisantes.

2. — *Essai* Em_2

Les résultats de la levée sont donnés dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Pourcentage de levée dans les différents traitements de l'essai Em_2

Régime des pluies	RMEL (sable)			DESS (limon)			TIRS (argile)		
	2 cm	5 cm	10 cm	2 cm	5 cm	10 cm	2 cm	5 cm	10 cm
Régime de pluie permanent ...	97 p. 100	94 p. 100	43 p. 100	100 p. 100	100 p. 100	90 p. 100	100 p. 100	97 p. 100	90 p. 100
Régime de pluie arrêté	100 p. 100	100 p. 100	93 p. 100	96 p. 100	93 p. 100	0 p. 100	100 p. 100	93 p. 100	83 p. 100

Au cours du dépotage, on a observé que toutes les semences avaient germé ; autrement dit, les différences de levées entre traitements sont dues à *des différences d'émergence et non de germination*. Ces différences indiquent une forte interaction régime de pluie-texture.

L'observation de surface des pots a montré que le *sol de texture limoneuse* a été totalement déstructuré par la séquence de pluie réalisée aussitôt après la mise en place des semences ; dans les pots subissant le régime de pluie arrêté, la couche battue s'est desséchée en surface et, au dépotage, on a pu observer que c'est au niveau de la croûte ainsi formée que se sont arrêtées toutes les plantules qui n'ont pas émergé, en particulier, celles correspondant au semis à 10 cm. Dans le sol de *texture argileuse*, les agrégats de surface sont restés bien individualisés et, en régime de pluie arrêté, on a pu noter une légère fissuration. *Le sol de texture sableuse* n'a pas donné, selon le régime des pluies, de différences de comportement structural observables à l'œil.

Les résultats du tableau 6 montrent que le régime de pluie permanent améliore l'émergence dans les textures argileuses et limoneuses, par suite, très vraisemblablement, d'une diminution de cohésion. L'amélioration ainsi apportée est d'autant meilleure que la structure au-dessus des plantules est continue (cas des pots à texture limoneuse). Dans le sable, par contre, le régime de pluie continue se manifeste d'une façon défavorable sur l'émergence. On peut formuler pour expliquer ceci deux hypothèses :

— ou bien le régime permanent de pluie induit un tassement des particules sableuses, ce qui se traduirait par un horizon de surface plus dense et plus difficilement franchissable par les plantules ;

— ou bien le sable perdrait de sa cohésion en séchant.

Il est difficile de trancher entre ces deux hypothèses. C'est pour tester la première que nous avons fait des mesures de densité apparentes dans les premiers cm de surface ; mais ces densités sont elles-mêmes modifiées par le pourcentage de plantules qui ont émergé, et le pot à 43 p. 100 de levée (semis à 10 cm, régime permanent) a une densité de surface très forte (1,7) dont on ne peut dire si elle est cause ou effet de la mauvaise émergence. En exceptant ce pot, les densités apparentes sont peu différentes (1,48) en régime permanent comme en régime stoppé. Le faible nombre de mesures interdit toutefois de conclure.

3. — *Conclusion sur les essais modélisés*

Dans chacun des deux essais modélisés, nous avons testé deux séquences pluviométriques :

— l'une avec dessiccation du profil entraînant un gradient hydrique,

— l'autre avec une pluviométrie régulière maintenant le profil hydrique à une humidité voisine de la capacité au champ.

Dans le premier cas, on a vu que les graines de surface sont soumises à des alternances d'humectation et de dessiccation qui aboutissent, en fin de compte, à un faible pourcentage de levée (par suite de la mort d'un certain nombre de graines), mais à l'opposé, des semis trop profonds induisent une mauvaise émergence des plantules germées et ce, d'autant plus que les horizons situés au-dessus des graines sont secs et que la structure est grossière. Dans ce type de séquence, on met en évidence un optimum de profondeur plus ou moins marqué selon la finesse de la structure et dont la valeur dépend de la réalisation des phénomènes dont il résulte : germination et émergence.

Dans le deuxième cas, le gradient hydrique étant faible, les conditions de germination et d'émergence varient peu avec la profondeur de semence, ce qui se traduit :

1) par une levée généralement meilleure que dans le premier cas,

2) par l'absence d'un optimum de profondeur : ce sont les grains de surface qui lèvent le mieux.

B. — LES ESSAIS EN PLEIN CHAMP.

Dans les essais étudiés, outre que l'on compare entre elles des séquences de techniques, on compare aussi des ensembles : séquences de techniques-séquences pluviométriques. Or, selon les différentes séquences climatiques, les levées peuvent se réaliser en deux temps ou en une seule fois. Le tableau 7 permet de voir comment se distinguent les différents cas.

TABLEAU 7

Rythme de levée selon les séquences pluviométriques

Référence de l'essai	E_1	E_2		
		E_{21}	E_{22}	E_{23}
Caractéristique sommaire des séquences pluviométriques par rapport aux travaux (cf. fig. 2).	— Travaux et semis en sol humide. — 23 j sans pluie. — Pluies régulières.	— Travaux et semis en sol humide. — 53 j sans pluie (sauf 9 mm). — Forte pluie de 30 mm.	— Premiers travaux en sol humide. — Semis et recouvrement en sec. — Forte pluie de 30 mm.	— Premiers travaux en sol humide. — Semis et recouvrement en sol humide. — 8 j sans pluie. — Pluies régulières.
Caractéristique du rythme de levée.	Levée en 2 temps.	Levée en 2 temps.	Levée en 1 temps.	Levée en 1 temps.

Quand, le semis ayant été réalisé dans un sol humide, le champ subit une longue période sèche avant la reprise des pluies (E_1 et E_{21}), on observe une levée en deux temps : le premier train de levée se réalise grâce à l'eau contenue dans le sol et le deuxième à la pluie (fig. 5). Dans les deux autres cas, nous n'avons observé qu'une

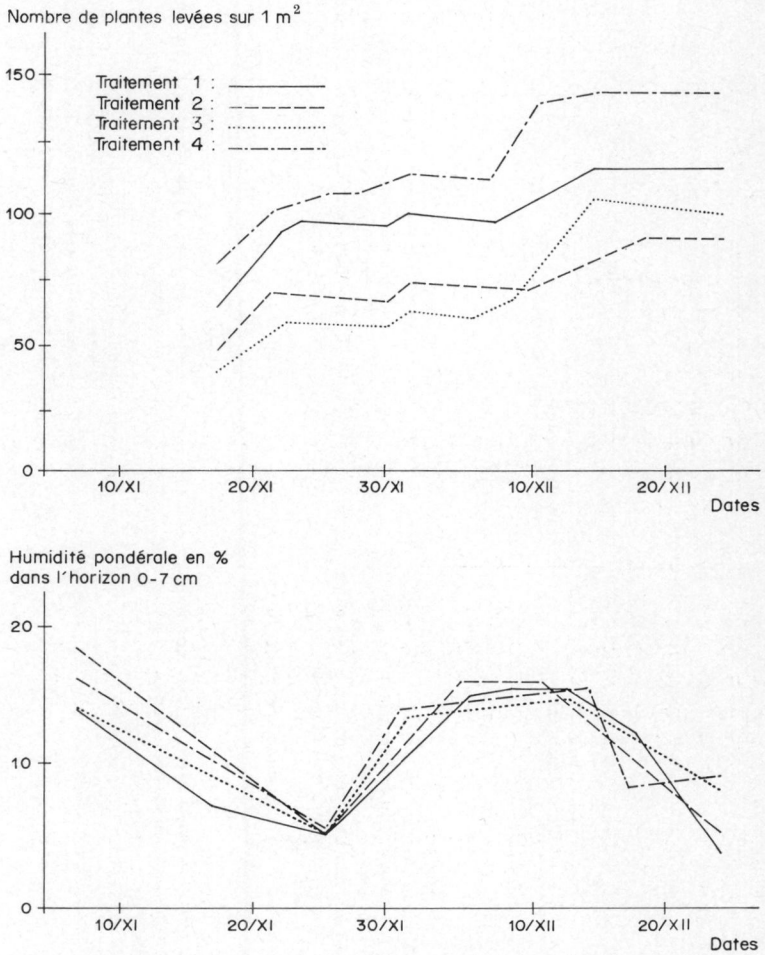


FIG. 5. — *Evolution comparée de la levée et de l'humidité dans l'horizon* 0-7 cm, *pour les différents traitements de l'essai* E_1.

seule levée, que le semis ait eu lieu en sec, à une humidité de 8 p. 100 ne permettant aucune germination (humidité à la capacité au champ 32 p. 100), et qu'il ait été humecté ensuite entièrement par une forte pluie de 30 mm (essai E_{22}), ou que le semis ait eu lieu en sol humide (à humidité suffisante pour faire germer les graines 23 p. 100) avec reprise des pluies 8 j après le semis, au bout d'un temps trop court pour que puissent se distinguer deux trains de levée (E_{23}).

Dans les cas où il y a deux séries successives de levée, la deuxième levée se réalise dans les conditions climatiques comparables à celles des levées des situations

TABLEAU 8

Conditions de travail et états strucuraux des lits de semences dans les essais en plein champ (1)

Référence de l'essai et type de travail préalable	Intervalle entre travaux préalables et semis		Etats structuraux et hydriques juste avant les semis		Etats structuraux juste après les semis
	Durée (en j)	Quantité de pluie (en mm)	Etats structuraux	Etats hydriques	
E_1	4	16	*Trait.* 1 *et* 4 : Surface : Grosses mottes (8 cm), résidus végétaux, peu de terre fine 10-17 cm : Beaucoup de terre fine entre bande de terre non ébranlée *Trait.* 3 : Mélange homogène sur 20 cm de mottes terre fine et résidus végétaux *Trait.* 2 : Surface fermée et continue. Quelques mottes cohérentes 0-10 cm : meuble		*Trait.* 1 : 0-12 cm : Grosses mottes très poreuses, Petites mottes peu poreuses, Très fine } en mélange 12-20 cm : Beaucoup de terre fine entre des îlots de terre peu ébranlée *Trait.* 2 : 0-12 cm : Très grosses mottes peu cohérentes et terre fine. Horizon très creux 12-20 cm : Mélange de mottes et terre fine ; cette dernière se trouve au flanc des bandes de terre non ébranlée *Trait.* 3 : 0-6 cm : Mélange de mottes et terre fine pas triée. Les mottes sont plutôt en surface 6-20 cm : Mélange homogène de mottes et terre fine *Trait.* 4 : 0-6 cm : Mottes en surface et terre fine en dessous. Bien triée 6-20 cm : Mélange de mottes et terre fine

E_{21} travail superficiel	5	0	0-10 cm : Petites motes et terre fine. Horizon poreux 10-20 cm : Horizon à structure continue compacte	12 à 13 p. 100 en moyenne	*Trait.* 5 *à* 8 : Beaucoup de terre fine en surface quel que soit le mode de semis
E_{21} travail profond	5	0	Grosses mottes en surface	12 à 13 p. 100 mais hétérogène dans le profil	*Trait.* 9 *et* 10 : Terre fine en surface *Trait.* 11 : Petites mottes sur terre fine *Trait.* 12 : Très petites mottes sur terre très fine en sillon
E_{22} travail superficiel	50	0	0-15 cm : Petites mottes et terre fine, poreux 10-20 cm : Horizon à structure continue compacte	0-10 cm : 8 p. 100 10-20 cm : 12 p. 100	*Trait.* 5 *à* 8 : Quelques mottes en surface
E_{22} travail profond	50	0	Grosses mottes en surface sèches et fissurées	—	*Trait.* 9 *à* 12 : Beaucoup de grosses mottes en surface cohérentes et fissurées. Peu de différences entre traitements
E_{23} travail superficiel	90	35	Profil humide et compact sur toute la profondeur travaillée au cover-crop, terre fine reprise en masse	23 p. 100 en moyenne	*Trait.* 5 *et* 6 : Mottes de pression en surface, horizon creux *Trait.* 7 *et* 8 : Peu de mottes en surface
E_{23} travail profond	90	35	En surface, les mottes ont éclaté	23 p. 100 en moyenne	*Trait.* 9 *à* 12 : Moins de mottes en surface que dans les trait. 5 et 6, mais plus cohérentes

(1) Dans tous les cas, les travaux préalables ont été réalisés après les premières pluies (voir fig. 2).

E_{22} et E_{23}. Toutefois, on ne peut comparer les résultats des reprises de levée de E_1 et E_{21} aux levées de E_{22} et E_{23}, car la réussite de ces reprises dépend de celle des premières levées : en effet, selon les cas, il va rester en terre plus ou moins de semences susceptibles de germer et de lever, soit qu'elles aient déjà levé, soit qu'elles soient mortes. Il faut donc traiter à part les reprises de levées des essais E_1 et E_{21}.

1. — *Comparaison des premières levées dans les quatre situations* (E_1, E_{21}, E_{22}, E_{23})

Pour l'ensemble de ces situations, nous allons présenter les résultats permettant de caractériser les états des lits de semences obtenus et leur évolution dans le temps, puis les résultats de la levée.

a) *Les états de lits de semence et leur évolution dans le temps.*

Etats structuraux des lits de semences.

Pour l'ensemble de ces essais, le tableau 8 présente les conditions de travail des premières façons culturales, les états structuraux qui en résultent au moment où l'on reprend la terre pour semer et recouvrir la semence, les états d'humidité au cours de ces dernières façons et les états après semis. Tous les renseignements obtenus dans ce tableau sont les résultats synthétisés d'observations de profils culturaux et de la surface du sol.

Dans l'essai E_1, où les observations d'états structuraux ont été plus poussées que dans les autres, les notations de taille de mottes montrent les différences entre traitements, mais ce sont les résultats du tamisage à sec qui caractérisent le mieux les différents lits de semence obtenus. Ces résultats sont reportés dans le tableau 9, en même temps qu'un indice de finesse de la structure I.

TABLEAU 9

Pourcentage pondéral de chaque classe de taille d'éléments structuraux dans l'horizon superficiel où se trouvent les graines (Essai E_1)

Traitements	1 Araire-semis Araire	2 Semis-Araire	3 Petite charrue herse-semis herse-herse	4 Araire-semis herse-herse
Profondeur de l'horizon	12 cm	12 cm	6 cm	6 cm
Taille (*a*) > 3 cm	37	36	32	30
des (*b*) de 1 à 3 cm	20 } 57 p. 100	28 } 64 p. 100	27 } 59 p. 100	20 } 50 p. 100
agré- (*c*) de 0,5 à 1 cm	10 p. 100	13 p. 100	11 p. 100	11 p. 100
gats (*d*) < 0,5 cm ..	33 p. 100	24 p. 100	30 p. 100	38 p. 100
$I = \frac{(d)}{(a)+(b)}$	0,52	0,37	0,51	0,76

Le traitement 4 est celui qui donne le lit de semence à structure la plus fine ($I = 0,76$). Les traitements 1 et 3 ont une même valeur d'indice mais sur des profondeurs qui ne sont pas les mêmes, et les observations de profil distinguent les deux états :

le traitement 1 donne un lit de semence dans lequel on observe plus de lacunes que dans le 3 et les éléments structuraux des différentes classes de taille y sont mélangés, tandis que dans les profils correspondant au traitement 3, les mottes reposent sur un lit de terre fine. Enfin, pour le traitement 2, l'indice est faible (I = 0,37) et les observations de profil montrent l'existence de grosses mottes qui forment une armature dans les horizons de surface et les rendent très creux.

Dans les différentes situations de l'essai E_2, les états structuraux obtenus pour une même séquence de techniques dépendent beaucoup de la séquence climatique ainsi qu'on peut le voir dans le tableau 8 ; c'est dans la situation qui correspond à un travail en sec, après une attente de 50 j sans pluie, à partir de la date des travaux préalables (E_{22}) que la structure est globalement la plus grossière, surtout lorsqu'il y a eu un travail profond préalable à la charrue à soc. Dans la situation E_{21}, comme les travaux au moment du semis ont été faits dans une terre assez humide (12 à 13 p. 100 d'eau), on aboutit, en fin de compte, pour tous les traitements, à une structure plus fine que dans la situation précédente, la différence restant nette entre les traitements avec et sans travail profond préalable. Enfin, dans la situation E_{23} où les travaux au moment du semis ont été faits à 23 p. 100 d'humidité, la petite charrue et le cover-crop ont fabriqué des mottes de pression dans les profils qui étaient constitués d'un horizon travaillé fait de terre fine reprise en masse (traitements 5 et 6) alors que tous les autres traitements sont beaucoup moins motteux.

Dans toutes les situations de l'essai E_2, le traitement au semoir crée des états structuraux différents des autres ; d'abord parce qu'il est systématiquement précédé d'un passage de croskillette qui peut avoir un double rôle : briser les mottes et les affiner lorsqu'elles sont friables (cas des traitements 8 et 8′ dans E_{23}) et, dans tous les cas, tasser les premiers centimètres du sol ; ensuite parce que le passage du soc fabrique un sillon qui se remplit surtout de terre fine et au fond duquel est placée la semence ; les mottes en général sont dégagées de part et d'autre de la ligne de semis. Un bon contact terre fine-semence est ensuite assuré par le passage d'une roue plombeuse.

Etats hydriques des lits de semences.

Les états hydriques des lits de semences dépendent :

— des états hydriques au moment du semis dans les profils ;
— des régimes pluviométriques subis.

— Dans l'essai E_1, l'humidité avant travaux était de 20 p. 100 environ (humidité à la capacité au champ : 27 p. 100) et homogène dans tout le profil ; mais aussitôt après le passage des outils, les humidités des différents traitements se différencient (fig. 5). Ce sont les traitements ayant subi les passages d'outil les plus profonds et les plus nombreux (notamment le traitement 1 : araire, semis à la volée, araire) qui, au départ, sont les plus secs dans les 7 premiers cm. A la fin novembre, après 23 j sans pluie, les horizons supérieurs de tous les profils ont atteint la même humidité de 5 p. 100.

Dans la situation E_{21}, l'humidité au départ est en moyenne de 13 p. 100 dans les 20 premiers cm (humidité à la capacité au champ : 32 p. 100), mais il existe en fait une différence entre les deux types de préparation préalable des terres : dans les parcelles

labourées à la charrue à soc, on observe une réparation très hétérogène de l'humidité du fait de la remontée d'horizons secs (il n'avait plu que 44 mm depuis le début de la saison).

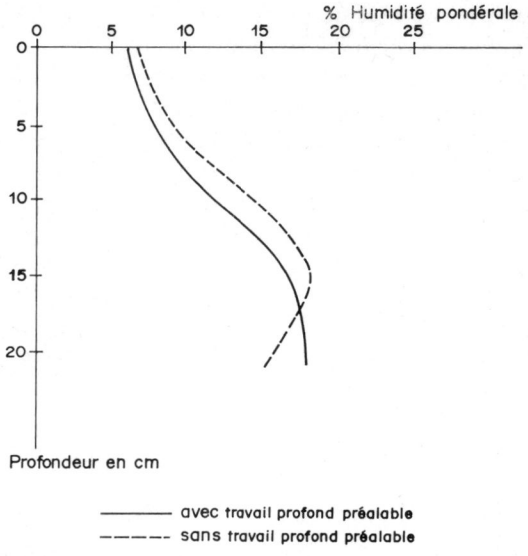


FIG. 6. — *Profil hydrique dans la situation* E_{21} *au terme d'une période sèche de* 40 j *après le semis.* Humidité à la capacité au champ : 32 p. 100.

Ces deux situations présentent une longue période de sécheresse, ce qui se traduit par un fort gradient hydrique ainsi que le montre la figure 6.

— Dans la situation E_{22}, l'humidité au moment des travaux de semis était de 8 p. 100, très insuffisante pour permettre la germination ; la pluie de 30 mm du 12 janvier donne une humectation assez homogène du profil (20 p. 100) pendant quelque temps. Après cette pluie, la surface du sol s'est desséchée, mais nous n'avons pas suivi l'évolution de l'humidité.

— Dans la situation E_{23}, l'humidité était de 23 p. 100 au moment des semis ; nous n'avons pas suivi l'évolution du profil hydrique mais nous pouvons penser que pendant les 8 j non pluvieux qui ont suivi le semis, les horizons superficiels se sont desséchés de façon plus marquée dans les traitements où la charrue et le cover-crop, ont plus remarié le sol que les autres ; ensuite, les pluies de février ont réhumidifié les profils de façon homogène.

Positions des graines dans les profils.

L'ensemble des différentes observations réalisées, ainsi que cela a été indiqué dans le paragraphe méthode, nous permet de schématiser la localisation des semences, ainsi que nous l'avons représenté sur la figure 7. D'après la façon dont on opère, cette représentation de la répartition des semences dans les profils ne peut être qu'approximative. Elle est cependant suffisante pour permettre, dans chaque essai, de classer les différents traitements les uns par rapport aux autres. Dans l'essai E_1, les traite-

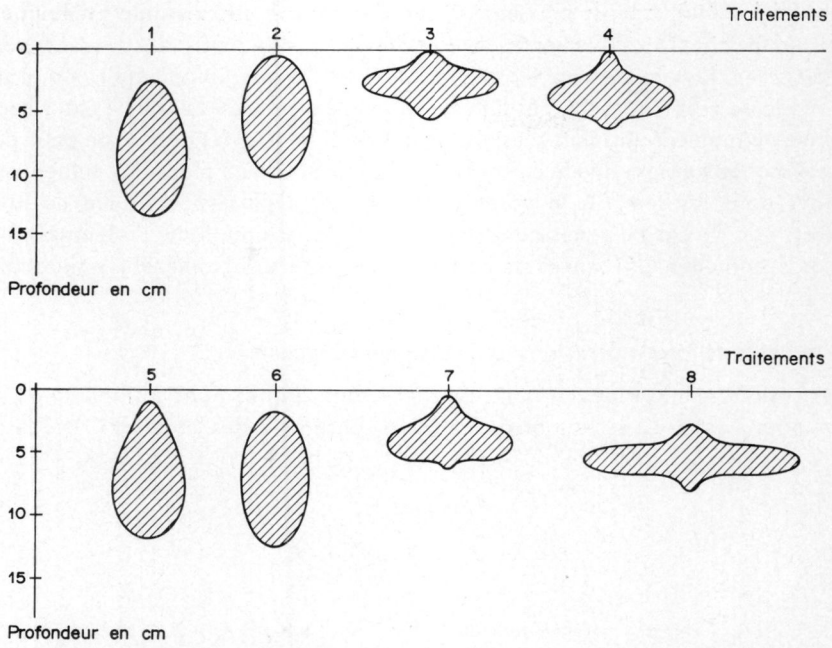


FIG. 7. — *Représentation schématique de la localisation des semences selon les différents modes de semis.* (1, 2, 3 ... = références des traitements : voir tabl. 4).

ments se classent comme suit par profondeur décroissante d'enfouissement : 1, 2, 3, 4. Nous avons réalisé des histogrammes de fréquences des pieds levés, par classe de profondeur des semences ; les caractéristiques de ces histogrammes sont données au tableau 10.

TABLEAU 10

Caractéristiques des histogrammes de fréquences des pieds levés par classe de profondeur des semences (Essais E_1) (1)

N° de référence des traitements	1	2	3
Forme de la distribution	unimodale peu marquée	unimodale peu marquée	unimodale très marquée
Profondeurs modales	2	3	3
Profondeurs médianes	3,75	3,75	2,75
Profondeurs moyennes	4,46	3,82	2,84
Ecart-type.....	2,71	2,10	1,36

(1) Le traitement 4 n'a pas été observé.

— Dans chacune des situations de l'essai E_2, on a mesuré, pour chaque mode de recouvrement, le pourcentage de plantes ayant un rhizome visible entre la semence et le plateau de tallage, valeur prise comme indice de profondeur des semences ;

dans toutes les situations, le classement par profondeur décroissante est toujours le suivant : petite charrue, cover-crop, semoir, herse.

Mais si les classements sont les mêmes, il est très vraisemblable qu'il y a, pour un même mode de recouvrement, des différences entre essais, du fait que l'état structural de surface au moment du semis n'est pas le même d'un essai à l'autre : on peut penser qu'un sol motteux et non nivelé en surface induit une mise en place des semences plus profondes dans les semis à la volée, mais peut être plus superficielle du fait des secousses, dans le cas du semis au semoir. Nous n'avons pu, faute de temps, caractériser ces éventuelles différences de mise en place entre les différentes situations de l'essai E_2.

b) *Les résultats de levée ; caractéristiques des plantes ayant levé.*

Les résultats finaux des premières levées sont donnés dans le tableau 11 — 1re ligne — pour l'essai E_1, et le tableau 12 pour l'ensemble des situations de l'essai E_2.

TABLEAU 11

Résultats de levée de l'essai E_1

N° de référence du traitement	1	2	3	4
p. 100 de levée (1re levée) : x	34	25	23	40
p. 100 de plantes non levées : 100 — x ...	66	75	77	60
p. 100 de levée (2e levée) : y	8	7	14	10
$z = \frac{y}{100 - x} \times 100$	12	9	18	17
p. 100 final de levée : x + y.....	42	32	37	50

On a suivi dans les différents essais le rythme de levée, tout particulièrement dans l'essai E_1 (fig. 5).

Dans l'essai E_1, une fois la levée totalement achevée, on a réalisé, pied par pied, les observations mentionnées au paragraphe consacré à la méthode. Ces observations permettent d'apprécier, par traitement, le tallage herbacé en fonction de la profondeur des semences ; les résultats sont représentés sur la figure 8 ; ils montrent que le coefficient de tallage herbacé a plutôt tendance à augmenter avec la profondeur.

Dans la situation E_{21}, on pouvait très bien distinguer, au moment du comptage final, les pieds de première et de deuxième levée ; des comptages ont été faits sur le traitement 9 qui correspond à un recouvrement à la petite charrue ; ils montrent que les pieds de première levée ont une profondeur supérieure à 3 cm et un tallage herbacé élevé (de 4,8 à 6,5), tandis que les pieds de deuxième levée ont une profondeur de semis inférieure à 5 cm dans plus de 50 p. 100 des cas et un tallage herbacé allant de 1,9 à 2,8.

TABLEAU 12

Résultat des levées de l'essai E_2
(cas de la première levée seulement dans la situation E_{21}*)*

	N° de référence du traitement (cf. tabl. 14)	Sans travail profond préalable								Avec travail profond préalable							
		5	5′	6	6′	7	7′	8	8′	9	9′	10	10′	11	11′	12	12′
E_{21}	p. 100 de levée (1er train de levée)	34,6	33,7	23,3	27,7	12,8	12,3	70,0	63,2	29,3	28,7	13,8	18,0	1,9	11,2	15,8	27,2
	Effet mode de semis	Semis à la volée : 24,1						Semoir : 66,6		Semis à la volée : 17,15						Semoir : 21,5	
	Effet profondeur de mise en place pour les semis à la volée	Recouvrement à la charrue : 34,1		Recouvrement au cover-crop : 25,6		Recouvrement à la herse : 12,5				Recouvrement à la charrue : 29,0		Recouvrement au cover-crop : 15,9		Recouvrement à la herse : 5,9			
	Effet travail préalable	34,7								18,3							
E_{22}	p. 100 de levée	55,5	52,8	48,0	53,6	47,2	47,7	69,0	75,1	54,9	51,3	44,4	54,0	51,3	55,5	58,5	65,8
	Effet mode de semis	Semis à la volée : 50,8						Semoir : 72,0		Semis à la volée : 51,9						Semoir : 62,1	
	Effet profondeur de mise en place pour les traitements à la volée	Recouvrement à la charrue : 54,15		Recouvrement au cover-crop : 50,8		Recouvrement à la herse : 47,45				Recouvrement à la charrue : 53,10		Recouvrement au cover-crop : 49,20		Recouvrement à la herse : 53,40			
	Effet du travail profond préalable	55,9								54,5							
E_{23}	p. 100 de levée	44,7	55,3	34,0	37,1	31,7	29,1	75,8	76,9	54,3	63,9	33,8	43,9	29,6	39,4	65,0	69,3
	Effet mode de semis	Semis à la volée : 38,65						Semoir : 76,35		Semis à la volée : 44,15						Semoir : 67,15	
	Effet profondeur de mise en place pour les traitements à la volée	Recouvrement à la charrue : 50		Recouvrement au cover-crop : 35,55		Recouvrement à la herse : 30,40				Recouvrement à la charrue : 59,10		Recouvrement au cover-crop : 38,85		Recouvrement à la herse : 34,50			
	Effet de travail profond préalable	48,1								49,9							

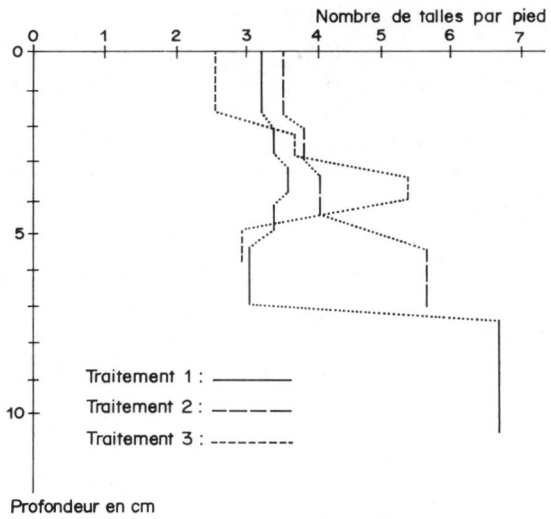


FIG. 8. — *Evolution du nombre de talles par pied en fonction de la profondeur des semences dans les traitements de l'essai* E_1.

Dans les deux autres situations, E_{22} et E_{23}, où la levée s'est réalisée d'un seul coup en un temps bref, les plantes, au moment de la levée, sont toutes à des stades voisins.

c) *Discussion.*

Les semis suivis d'une longue période de sécheresse (E_1 et E_{21}).

Nous allons discuter les résultats à deux niveaux :

1. — *Les relations lits de semence — résultats de la levée.*

La profondeur de la semence, la granulométrie de la structure influencent la levée.

Profondeur des semences : Ce sont les semences les plus profondes qui ont participé à la première levée. Plusieurs arguments étayent cette affirmation :

— La variation du tallage herbacé en fonction de la profondeur (fig. 8) ; lorsque deux semences germent ensemble, la plus superficielle des deux lève la première et possède en général plus de talles que l'autre à un moment donné. Le fait que l'on ait enregistré un coefficient de tallage augmentant légèrement avec la profondeur, ou tout au moins constant, laisse à penser que les semences les plus profondes ont levé les premières.

— Le pourcentage de levée dans les différents traitements, tout au moins lorsque les états structuraux sont similaires ; dans l'essai E_1, la comparaison des traitements 1 (araire, semis, araire) et 3 (petite charrue, herse, semis, herse) qui ont un même indice de finesse (tabl. 9) donne une nette supériorité au premier (tabl. 11) dont les profondeurs médianes et moyennes de semences sont plus élevées (tabl. 10). Dans la situation E_{21}, où l'on doit exclure de la comparaison les traitements au semoir précédé d'une croskillette, car il donne un lit de semence nettement différent des autres, les trois traitements de semis à la volée se classent, quant au résultat de pourcentage de levée, dans l'ordre des profondeurs de mise en place des graines (tabl. 12).

Ces faits sont à relier à l'existence, dans ce type de séquence climatique, d'un fort gradient hydrique (fig. 6). Les conditions de germination sont meilleures en profondeur, toutes choses égales par ailleurs. Le tableau 12 (E_{21}) montre qu'elles sont d'autant plus améliorées par la mise en place profonde que les conditions d'imbibition sont défectueuses, ainsi qu'on le voit en comparant les résultats des traitements avec travail préalable (état relativement sec, structure grossière) à ceux des traitements sans ce travail profond préalable.

Granulométrie de la structure : La finesse de la structure semble améliorer le pourcentage de levée. Plusieurs arguments étayent cette affirmation, mais aucun d'eux n'est décisif, car, en général, la finesse de la structure varie avec d'autres caractéristiques qui peuvent être favorables à la levée. Ces arguments sont les suivants :

— L'effet du travail profond préalable dans l'essai E_{21} ; les résultats du tableau 12 montrent que les levées sont nettement meilleures, aussi bien pour les semis à la volée qu'au semoir, dans les parcelles sans travail profond préalable qui se différencient des autres par la finesse de la structure, mais également par une humidité plus élevée.

— Le passage de la croskillette après semis ; il a un rôle d'affinement de la structure, confondu avec un rôle de tassement ; mais il est vraisemblable que le premier rôle est très important pour expliquer la différence de résultats de 1,9 à 11,2 p. 100 entre les traitements 11 et 11′ (cf. tabl. 4) ; nous avons vu, en effet, que dans le traitement 11, existaient beaucoup de mottes en surface.

— La comparaison des traitements 1 et 4 de l'essai E_1 est plus décisive. Le traitement 4 a un indice de finesse plus grand que 1 (tabl. 9) et une levée supérieure (tabl. 11) bien que les semences soient moins profondes (fig. 7).

Enfin, on est conduit à penser que la supériorité du semis au semoir (surtout des traitements 8 et 8′) sur les traitements à la volée comparables (traitements 5,5′ ; 6,6′ ; 7,7′) s'explique en grande partie par le fait que le passage de croskillette affine la terre et que le passage du soc met la semence dans un lit de terre fine triée. Certes, le semoir conduit également à un tassement plus poussé du lit de semence, mais ce dernier effet ne peut suffire à expliquer la différence.

2. — *Les relations techniques lits de semence — résultats de levée.*

Les semis en sols humides suivis de sécheresse (E_1 ; E_{21}).

Les outils comme l'araire, la petite charrue ou le cover-crop donnent des lits de semences hétérogènes où sont mélangées mottes, terre fine et semences. Dans le type de séquence climatique étudié, avec fort gradient hydrique, ce sont ces traitements qui donnent les meilleures levées car ils permettent un enfouissement profond. Mais les techniques qui permettent d'affiner plus encore la terre et surtout de la trier de façon à mettre en contact semence et terre fine tout en plaçant les semences à des profondeurs de l'ordre de 4 cm (ce que font le semoir dans les traitements 8,8′, 12 et 12′ et la herse dans le traitement 4), améliorent le pourcentage de levée. A noter cependant que, dans la situation E_{21}, le traitement à la herse donne les moins bons résultats, alors qu'il donne le meilleur dans l'essai E_1. C'est peut-être dû au fait que le seul passage de herse dans E_{21} n'était pas suffisant pour assurer le tri motte-terre fine, et que, même dans la préparation la plus fine de E_{21}, les agrégats de terre étaient moins friables que dans E_1.

L'effet du passage de la croskillette après semis est positif à nul selon les cas.

En aucun cas, il n'a d'effet lorsque le recouvrement a lieu à la charrue (5′ et 9′ comparés respectivement à 5 et 9), peut-être parce que les semences y sont trop profondes pour qu'elles soient affectées par le traitement. Il n'a d'effet sur le mode de recouvrement à la herse ou au semoir que dans les parcelles qui, ayant subi au préalable un labour profond, sont motteuses en surface après le passage de ces outils ; dans les parcelles déjà affinées, la croskillette n'a pas d'effet, ce qui met en évidence l'intérêt de son rôle de fractionnement des mottes lorsqu'elles sont trop abondantes, et le fait que le tassement a peu d'effet dans des horizons trop secs en surface pour permettre l'imbibition des semences. Par contre, qu'il y ait ou non travail profond préalable, le passage de la croskillette a un effet bénéfique dans les traitements avec enfouissement au cover-crop.

Les semis en sec (E_{22}). La différence de résultats la plus nette qui ressort du tableau 12 (situation E_{22}) est entre les traitements à la volée et au semoir. Ces derniers sont nettement plus élevés que les autres (67 p. 100 contre 51,3 p. 100 en moyenne) et ils sont entre eux plus différenciés. La fabrication de terre fine par le passage préalable de la croskillette, le travail, déjà décrit, du soc du semoir, la localisation des semences à une profondeur qui met la semence à l'abri des dessiccations et qui ne soit pas trop profonde pour l'émergence, peuvent expliquer la supériorité du semoir. Il est à noter que l'effet du passage croskillette-semoir est d'autant meilleur que la terre au départ est plus fine (traitements 8 et 8′ comparés à 12 et 12′). En terre motteuse, le train d'outil croskillette-semoir (traitement 12) donne le même résultat que le semis à la volée suivi d'un passage de herse et de croskillette (traitement 11′) ; les lits de semences doivent être très similaires.

Le tableau 12 indique, par ailleurs, que, quel que soit le traitement, dans le cas des semis à la volée, on a un taux de réussite de levée assez homogène et avoisinant 50 p. 100. Or, le tableau 8 montre qu'il y a des différences de granulométrie des éléments structuraux entre les traitements avec ou sans travail profond préalable ; par ailleurs, la séquence pluviométrique : forte pluie de 30 mm en un jour qui imbibe l'ensemble du profil, suivie d'une période sèche jusqu'à la levée, laisse supposer qu'il y a eu dessiccation en surface. Qu'il y ait peu de différence entre les traitements avec ou sans travail profond préalable montre que l'humidité du sol, qui est plus forte dans la situation E_{22} que dans E_{21}, compense l'effet d'une granulométrie d'agrégat trop grossière, supérieure à celle observée dans l'essai E_{21}. Qu'il y ait peu de différence entre les différents traitements de semis à la volée selon la profondeur des semences laisse supposer que l'on aboutit à des résultats similaires pour des raisons différentes : dans les semis profonds, le phénomène limitant la levée serait l'émergence de plantules ayant germé. Dans les semis à la herse, ce serait la réduction de la germination par suite d'un manque d'eau. Ces résultats sont explicables avec les schémas de fonctionnement que l'on a pu tirer des essais modélisés.

Les semis en sol humide, suivis de pluies (E_{23}). Les travaux de semis, faits en conditions humides (20 p. 100 pour une humidité à la capacité au champ de 32 p. 100), ont conduit ainsi que nous l'avons vu, à une préparation plus grossière et plus creuse pour les traitements à la charrue à soc et au cover-crop.

La supériorité des traitements au semoir apparaît encore nettement et ce, d'autant plus que la structure au préalable est plus fine (8 et 8′ comparé à 12 et 12′). Dans les traitements à la volée, on obtient les meilleurs résultats de levée là où la

granulométrie d'agrégat au départ est la plus fine (parcelle avec travail profond préalable) et où les places de semences sont les plus profondes. Ce qui montre que les conditions d'imbibition des semences ont été déterminantes.

Le passage de la croskillette a un effet sur la levée surtout dans les traitements à la charrue et au cover-crop qui ont laissé un profil creux.

Comparaison des situations entre elles. La comparaison porte sur trois situations de E_2 qui concernent les mêmes techniques et la même texture.

Les essais se distinguent :

— Par l'état structural créé par les outils de travaux préalables (charrue à soc et cover-crop dans un cas, cover-crop dans l'autre) ; en effet, cet état structural évolue dans le temps en raison de l'activité structurale de ce type de terre. Les mottes de surface s'affinent progressivement.

— Par l'humidité au moment des travaux de semis (13 p. 100 pour E_{21} ; 8 p. 100 pour E_{22} ; 23 p. 100 pour E_{23}), ce qui fait que l'action des outils de recouvrement des semences n'est pas la même ; en E_{22}, les éléments terreux étant cohérents on obtient les profils les plus motteux ; en E_{21}, les outils affinent la terre ; en E_{23}, ils fabriquent les mottes de pression, surtout dans le traitement préalablement travaillé au cover-crop.

— Par les séquences hydriques décrites plus haut.

Les résultats ont montré qu'il existait une différence toujours nette entre semis au semoir et à la volée. Le tableau 13 présente les résultats moyens de ces deux modes de semis.

TABLEAU 13

Résultats moyens par mode de semis dans les situations de E_2

Référence de l'essai	Semis à la volée	Semis au semoir (précédé d'un passage de croskillette)	Moyenne
E_{21}	20,6	44,0	32,3
E_{22}	51,3	67,05	59,2
E_{23}	41,4	71,7	56,6

Les résultats sont les moins bons là où les conditions hydriques sont les plus défavorables (E_{21} : dessiccation à partir d'une humidité moyenne de surface de 13 p. 100). La différence entre E_{22} et E_{23} réside dans le fait que la semence était en place dans le profil lors de la pluie de 30 mm du 12 janvier pour le premier, tandis que dans le cas du second, on a réalisé le semis après cette pluie (fig. 2) ; bien que la levée de E_{23} se soit réalisée non seulement sur l'eau du sol, mais aussi après de nouvelles pluies survenues 8 j après, les pourcentages de levées sont inférieures dans E_{23} à ceux qu'ils sont dans E_{22}, tout au moins pour les semis à la volée ; c'est la conséquence de l'assèchement provoqué par le remaniement du profil par les outils de recouvrement des semences. On ne retrouve pas cet effet dans le cas du semoir qui ne retourne pas le sol ; c'est, au contraire, dans l'essai E_{23} qu'il donne le meilleur résultat.

Ce qu'il faut faire ressortir ici, c'est que, dans les conditions testées dans les essais, le mode de semis à la volée ne permet guère de dépasser 50 p. 100 de réussite ; on atteint 60 p. 100 dans les meilleures conditions.

2. — *Les reprises de levée (E_1 et E_{21})*

a) *Les états de lit de semence et leur évolution dans le temps.*

Etats structuraux des lits de semence.

La situation E_{21} correspond à une terre à bonne stabilité structurale et les états structuraux des lits de semence n'ont guère été modifiés, tout au moins de manière facilement repérable, sous l'action de la pluie, pourtant forte, survenue le 12 janvier. L'essai E_1 est réalisé en terre battante et les pluies de fin novembre et début décembre (voir fig. 2) ont nettement modifié la structure du sol et de façons différentes selon les états de départ. Les observations de mottes à trois dates successives, ainsi que les photographies, permettent de décrire l'évolution du phénomène et de comprendre les différences qui se sont manifestées.

Ces pluies ont créé une couche battue dans tous les traitements ; mais elle est plus continue et plus étendue dans le traitement 2 (semis à la volée, araire) qui, avant l'arrivée des pluies, comportait en surface de plus grosses mottes poreuses dans des horizons creux. Sous l'action des pluies, ces mottes se sont délitées et transformées en couche boueuse. Les traitements 3 et 4 qui ont donné des profils comportant en surface des mottes de 6 cm de diamètre (valeur modale) bien réparties, ont une couche de battance moins continue que le traitement 2.

Etats hydriques.

Dans les deux cas, la levée finale a été obtenue quelques jours à peine après le retour des pluies (voir fig. 2) et les sols n'ont guère eu l'occasion de se dessécher en surface. Dans les 10 premiers cm, l'humidité était voisine de 17 p. 100 dans E_1, de 22 p. 100 dans E_{21}.

b) *Les résultats de levée.*

Les résultats de cette reprise de la levée sont donnés respectivement dans les troisièmes lignes des tableaux 11 (pour E_1) et 14 (pour E_{21}). Par ailleurs, le rythme de levée de l'essai E_1 est représenté à la figure 5.

Les observations de plantes faites au moment du comptage final montrent que ce sont surtout des semences peu profondes qui ont participé aux reprises de levées. Dans l'essai E_1, la couche battue n'a pas gêné la levée car elle était, alors, suffisamment humide.

TABLEAU 14

Résultats de la reprise de la levée dans l'essai E_{21} (en p. 100)

Référence des traitements	Effet travail profond		Effet mode de mise en place des semences :			
	Absence	Présence	Petite charrue	Cover-crop	Herse	Croskillette semoir
1e train de levée : x p. 100	34,7	18,3	31,6	20,8	9,6	44,10
Reste non levé : 100 — x	65,3	81,7	68,4	79,2	90,40	55,90
2e train de levée : y p. 100	13,8	38,6	16,9	16,9	30,1	40,7
$z = \frac{y}{100 - x} \times 100$	21,1	47,2	24,7	21,3	33,3	72,8
Levée définitive : $x + y$	48,5	56,9	48,5	37,7	39,7	84,8

c) *Discussion.*

Dans E_{21} les résultats de reprise de levée après la pluie du 12 janvier sont différents selon les traitements alors que, ainsi que nous l'avons vu plus haut dans le cas du semis en sec (E_{22}), la même pluie a provoqué un pourcentage de levée identique (50 p. 100) pour tous les semis à la volée qui correspondaient à des états structuraux de lits de semences différents. Pour expliquer les différences entre les traitements de E_{21}, on peut penser que, selon le pourcentage de première levée, il reste en terre plus ou moins de semences susceptibles de participer à une reprise de levée. On tient compte de ceci en exprimant la reprise de la levée en pourcentage des plantes non levées la première fois : z (4e ligne des tableaux 11 et 14). Ces résultats sont inférieurs à 50 p. 100 et notablement différents entre eux. Nous pensons pouvoir attribuer une partie de cette différence au fait qu'entre la première et la deuxième germination, des plantules sont mortes. Les résultats du tableau 14 montrent que les valeurs de z sont d'autant plus faibles que la première levée a été meilleure. On pourrait donc penser que le fait de placer les semences en mauvaises conditions de germination dans les semis précoces, en plaçant les graines superficiellement, pourrait éviter la mort des plantules.

Il n'en reste pas moins vrai que, globalement, dans les deux séquences climatiques dont l'une correspond à une période de sécheresse exceptionnellement longue (E_{21}), ce sont les traitements qui donnent les meilleurs résultats en première levée qui sont encore les meilleurs en fin de compte. On n'a donc pas intérêt dans les semis précoces à placer les semences en mauvaises conditions de germination en les semant superficiellement, comme ceci semble envisagé par certains auteurs (Arnon, 1972) (1).

3. — *Discussions des résultats finaux des essais en plein champ*

Le tableau 15 regroupe les résultats finaux des différentes situations E_2 par mode de recouvrement des semences.

TABLEAU 15

p. 100 *de levée des différentes situations* E_2 *par mode de semis*

Outil de recouvrement	Petite charrue	Cover-crop	Herse	Semoir (précédé d'un passage de croskillette)
E_{21}	48,5	37,7	39,7	84,8
E_{22}	53,6	50,0	50,43	67,0
E_{23}	54,5	37,2	32,4	71,7
Moyenne	52,2	41,6	40,9	74,5
Coefficient de variation.....	0,06	0,17	0,22	0,12

(1) Notre conclusion nous paraît d'autant plus justifiée que nous avons montré, par ailleurs, la grande capacité du blé une fois levé et enraciné à résister à de longues périodes de sécheresse (Lelièvre et Papy, 1976). Les conclusions de Arnon semblent par contre justifiées en zone aride.

Le classement des traitements est le même dans les différents essais, et des explications de ces différences ont déjà été données. Parmi les modes de semis à la volée, celui qui correspond à l'enfouissement le plus profond donne la valeur la plus élevée mais également la moins variable dans les différentes situations où elle a été mise à l'essai. *Dans toutes les séquences climatiques testées dans ces essais, l'imbibition paraît être déterminante et l'enfouissement en profondeur une garantie.* En améliorant les conditions d'imbibition par la fabrication de plus de terre fine, disposée en lit autour des semences et tassée, la succession croskillette semoir donne de bons résultats, moins variables que le simple recouvrement à la herse, mais plus que le recouvrement à la petite charrue. C'est que :

— les graines placées davantage en surface sont, malgré tout, plus soumises aux variations de l'humidité,

— les résultats au semoir sont particulièrement sensibles aux états structuraux préalables ; dans le cas de préparation du sol motteux (E_{22}), le semoir donne des résultats relativement faibles.

Les résultats de l'essai E_1 (dont la séquence climatique s'apparente à celle de E_{21}) donnent des résultats globalement moins bons. Ceci ne peut être attribué, dans le cas de l'essai, au fait que la terre est instable, parce que le phénomène de battance n'est intervenu qu'après la série de pluies ayant provoqué la reprise de levée et que cette dernière a eu lieu avant que la couche battue ne se transforme en croûte. La différence tient à la structure des profils avant les opérations de semis proprement dit : parce que la terre dans E_2 a une meilleure activité structurale (début de fissuration aux pluies de début octobre) et que tous les traitements de ces essais ont reçu un passage de cover-crop qui a plus affiné la terre que les passages d'araire ou de petite charrue dans l'essai E_1, la terre était dans l'ensemble moins affinée dans ce dernier. Les profils culturaux préparés à l'araire étaient également plus creux.

IV. — Conclusion générale

1. — *Synthèse des résultats*

Les essais modélisés et les essais en plein champ donnent des résultats concordants. En effet, si les réussites de levées sont meilleures dans les premiers que dans les seconds, c'est qu'en fait les séquences climatiques les plus défavorables à la levée dans les essais modélisés (séquence n° 1 dans Em_1 et séquence stoppée dans Em_2) correspondent aux plus favorables des essais en plein champ. C'est ainsi que la séquence in° 1 de Em_1 correspond exactement à E_{22} et dans ce cas, les résultats des levées sont identiques.

Nous allons synthétiser les résultats en deux étapes :

- Influence des états (structuraux et hydriques) du lit de semence sur la levée.
- Influence de la place respective des pluies et des travaux sur la levée.

a) *Les relations lit de semence-levée.*

Avec les séquences pluviométriques testées dans les essais en plein champ, même lorsque la pluie est relativement continue, on a toujours observé une dessiccation

superficielle des profils avec des répercussions sur la levée. Comme les séquences climatiques de pluies fines et continues semblables à celles testées dans les deux essais modélisés sont très rares en climat méditerranéen, on doit, pour schématiser les relations lit de semence-levée, se placer dans l'hypothèse de gradient hydrique plus ou moins marqué. Il est d'autant plus justifié de se situer dans cette optique que dans le cas inverse où les pluies sont petites et continues, les pourcentages de levée sont tous bo ns et voisins quels que soient les états de lit de semence.

Dans l'hypothèse d'un gradient hydrique, nous avons montré par les essais modélisés qu'il existerait une profondeur optimum, compromis entre les exigences de germination (il faut semer assez profond pour placer des graines dans des horizons suffisamment humides) et d'émergence (la cohésion des horizons secs de surface gêne la sortie des plantules, d'autant plus que ces semis sont profonds). La germination étant la condition première de la levée, on peut penser que, moins les conditions d'imbibition des semences (teneur en eau, mais aussi contact terre-semence) sont favorables, plus la profondeur optimum est grande et plus le pourcentage de levée est faible à cause des difficultés d'émergence qui augmentent. Ce schéma est en concordance avec les résultats obtenus dans les essais en plein champ à condition que l'on y distingue bien deux types de lits de semences correspondant à deux itinéraires techniques :

— les lits de semences obtenus avec les semis à la volée dans lesquels les graines sont réparties sur une gamme de profondeur assez grande et placée dans un mélange de mottes et terre fine et que nous pourrions appeler « lit de semence en vrac »,

— les lits de semences obtenus avec le semoir, dans lesquels les semences se trouvent presque toutes à une profondeur identique (en l'occurrence 4 cm) et placées dans des sillons de terre fine, triée à partir du mélange originel contenant également des agrégats plus grossiers, et tassée autour des semences. Dans ce type de lit de semence que nous pourrions appeler « construit », le contact graine-semence est mieux assuré.

Pour les différents modes de semis à la volée, c'est dans la quasi-totalité des cas, celui qui place les semences les plus profondes, qui donne les meilleurs résultats, surtout lorsque le gradient hydrique est très marqué (E_{21}). Si nous ne mettons pas ici en évidence l'existence d'une profondeur optimum, comme dans les essais modélisés, c'est que les différentes séquences pluviométriques des essais en plein champ induisent des humidités moins élevées dans les profils ; dès lors, les semences germent d'autant mieux qu'elles sont profondes. Quoi qu'il en soit dans les essais E_1 et E_2, on met en évidence que les pourcentages de levées avec « lit de semence en vrac », ne dépassent guère 53 p. 100 dans les meilleures conditions climatiques testées.

Les lits de semences « construits » obtenus au semoir donnent dans toutes les conditions des résultats supérieurs aux précédents. Il est aisé d'en saisir les raisons : meilleur contact graine-terre, mise en place aux profondeurs déterminées comme optimum dans les semis modélisés. Il faut toutefois noter que ce résultat n'est pas simplement dû au tri motte-terre fine créé par l'action du sabot du semoir, mais également au tassement et sans doute aussi à l'affinement préalable créé par le passage de croskillette avant le semoir. L'effet du semoir n'est bénéfique que s'il existe assez de terre fine au préalable ; c'est ainsi que dans un profil relativement motteux en

surface (E_{22}), nous avons vu que le semoir réalisait un travail similaire au simple passage de herse.

On peut alors se demander si, avec un semis à la volée et une séquence d'outils adaptés, on ne peut réaliser un « lit de semence construit ». Ce n'est sans doute pas impossible et c'est vraisemblablement ce que l'on a plus ou moins obtenu avec le traitement 4 dans l'essai E_1 (araire, semis, herse, herse). Les différents traitements des essais en plein champ n'avaient pas été choisis pour répondre à ces questions. On peut toutefois avancer que cet itinéraire technique nécessite au départ qu'on ait assez de terre fine (cas du traitement 4) et que cette terre soit ensuite bien triée. Si les traitements à la herse des essais E_2 n'ont pas donné les mêmes résultats que le traitement 4 de l'essai E_1, c'est vraisemblablement que le seul passage de herse ne suffisait pas à fabriquer un horizon à 4 cm constitué uniquement de terre fine et de graine. Mais, ne l'ayant pas observé, nous ne pouvons malheureusement l'affirmer.

b) *Influence sur la levée de la place respective des pluies et des travaux.*

Les différentes séquences climatiques testées montrent que la meilleure est la séquence de fines pluies continues juste après le semis, c'est elle qui permet d'obtenir de bons résultats de levée quels que soient les lits de semence (essais modélisés). Mais nous ne pouvons compter en climat méditerranéen sur un tel type de séquence de pluie. Vient ensuite le semis en sec avec levée à la pluie, lorsque toutefois la pluie est suffisante pour humidifier le profil jusqu'aux semences les plus profondes.

Dans tous les cas, on obtient les plus mauvais résultats lorsque l'on sème après une pluie et que la levée se fait à partir de l'eau contenue dans le profil : les outils de mise en place des semences en remuant le sol accélèrent, en effet, la dessiccation du profil, d'autant plus qu'ils le retournent davantage. Là encore, apparaît une supériorité du semoir sur les outils de recouvrement comme la petite charrue, le cover-crop ou l'araire.

2. — *Conséquences pratiques*

a) *Références.*

A partir des essais présentés, on peut tirer des références pour les différents modes de semis. Lorsque l'on sème à la volée, il faut largement augmenter les doses de semis conseillées pour des semis réalisés au semoir. Selon qu'au départ on a pu obtenir plus ou moins de terre fine, selon que l'on sème en sec ou dans un profil déjà suffisamment humide pour permettre une levée, on devra plus ou moins ajuster les doses en tenant compte des résultats mentionnés plus haut.

Les pourcentages de levée ne seront vraiment bien améliorés que si l'usage du semoir, pratiquement inconnu dans les campagnes marocaines, se généralise. Dans un climat à période pluviométrique discontinue, son intérêt semble plus grand encore qu'en climat plus tempéré où les séquences de pluies à l'automne sont plus longues et moins brutales. On peut se demander alors pourquoi son utilisation n'est pas plus généralisée.

b) *Problématique des semis.*

Nous avons présenté quelques éléments de réponse à cette question : le semoir ne réalise bien un « lit de semence construit » que si, au préalable, il y a assez de terre

fine dans les horizons superficiels. Or les possibilités de préparer assez finement la terre sont limitées. C'est particulièrement vrai en agriculture traditionnelle, en traction attelée, où il faut attendre les premières pluies pour effriter le sol à l'araire dont l'usage se justifie mieux pour cette fonction que la petite charrue à versoir qui, à humidité égale, effrite moins le sol (1) ; c'est moins justifié, bien sûr, dans le cas de la traction mécanique où grâce à la puissance on peut travailler une terre desséchée après l'été. Dans un cas comme dans l'autre, il faut se donner les moyens d'obtenir le plus tôt possible de la terre fine en surface. Cela implique que l'on prépare les terres dès la récolte précédente alors qu'il y a encore de l'humidité dans le sol et que l'on introduise des outils nouveaux pour briser les mottes sèches (croskill par exemple).

Par ailleurs, on ne peut raisonner la place respective des travaux et des séquences climatiques uniquement en fonction des meilleures conditions de levées, car les travaux de semis ont aussi comme rôle de détruire les mauvaises herbes et les deux objectifs sont souvent contradictoires.

Aussi, sur le plan pratique, les résultats obtenus ne constituent-ils qu'un des éléments à prendre en compte pour raisonner les décisions de semis.

Reçu pour publication en janvier 1978.

(1) C'est pour cette raison que ces petites charrues à versoir ne se répandent que dans les terres sableuses, en dépit des efforts de vulgarisation.

Remerciements

Nous remercions Michel Sebillotte (Professeur d'Agronomie à l'INA Paris-Grignon), Professeur associé à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (Rabat), qui nous a aidés à élaborer et conduire notre programme de recherches et a bien voulu revoir nos manuscrits. Nous remercions également François Lelièvre, assistant à l'Institut de Rabat pour ses conseils au cours de notre rédaction.

Summary

Conditions necessary for a successful emergence under the Mediterranean climate : case of the dry cereal culture northwards of the morocco

Field surveys carried out northwards of Morocco revealed that the percentages of emergence were often very low. An analysis of the climatic characteristics of the Mediterranean autumns stresses the violence of the rains and alternances of rainy and dry sequences which can be directly considered as unfavourable to emergence. Is it not yet possible to improve the emergence percentages by the techniques ?

To answer this question we set up two series of trials : model trials which present the advantage of bringing some explanations and field trials in which different techniques (classical and improved) are compared under different climatic conditions.

The model trials show that, when there is a strong hydrous gradient in the profile, an optimal depth of sowing is observed which is a compromise between the germination and the emergence requirements. The field trials show that, for all the climatic sequences tested, the seed-drill is superior to the different modes of broadcast sowing. But the seed-drill requires surface horizons already well loosened. With broadcast sowing the percentage of emergence hardly exceeds 50 p. 100. The deepest sowings (seed ploughing under with the little plough) often give the best emergence and the less dependent on climatic conditions.

The coherence of these results as well as their practical applications are discussed.

Zusammenfassung

Bedingungen fur ein erfolreiches Aufgehen unter Mittelmeerklima (Fall der Getreidetrockenkulturen im Norden Marokkos)

Felduntersuchungen im Norden Marokkos haben gezeigt, dass die Aufgehprozentsätze oft sehr niedrig waren. Eine Analyse der klimatischen Verhältnisse der Herbst im Mittelmeerraum macht die Stärke der Regen und der Wechselfolge von regnerischen und trockenen Sequenzen anschaulich, Bedingungen die man von vornherein als ungunstig für das Aufgehen annehmen kann. Kann man nicht doch die Aufgehprozentsätze durch die Technik verbessern ?

Um diese Frage zu beantworten, haben wir zwei Versuchsreihen veranstaltet : Musterversuche, die den Vorteil haben, erklärend zu sein, und Feldversuche, in denen verschiedene (klassiche und verbesserte) Techniken unter verschiedenen Bedingungen verglichen werden.

Die Musterversuche beweisen dass, man bei hohem Wassergradient im Profil eine optimale Saattiefe beobachtet, die ein kompromiss zwischen den Keimungs- und Aufgehbedürfnissen ist. Die Feldversuche beweisen die Überlegenheit der Sämaschine gegenüber den verschiedenen Arten von Breitsaaten. Die Sämaschine erfordert jedoch schon gut bearbeitete Oberflächenhorizonte. Mit Breitsaaten ist der Aufgehprozentsatz nicht viel höher als 50 p. 100. Die tiefsten Aussaatarten (Unterpflügen der Körner mit dem kleinen Pflug) ergeben oft das beste und von Klimaverhältnissen am wenigsten abhängige Aufgehen.

Der Zusammenhang und die praktische Anwendung dieser Ergebnisse werden erläutert.

РЕЗЮМЕ

Условия успешной всхожести в средиземноморском климате. (Неорошаемые злаковые культуры в северной части Марокко).
Фенек Ж., Папи Ф.

Полевые анкеты, проведенные в северной части Марокко, показали, что процент всхожести злаковых культур, бывает там часто довольно слабым. Анализ климатических характерностей средиземноморской осени выявляет силу дождей и чередование дождливых и засушливых периодов, что конечно не представляет благоприятные для всхожести условия. И, ставится вопрос : можно-ли в этих условиях технологически увеличить процент всхожести ?

Для ответа на этот вопрос были поставлены две серии опытов : опыты на моделях, об'яснительность которых является их преимуществом, и полевые опыты, ε которых в разных климатических условиях, сравнивались различные технологии (классические и улучшенные).

Опыты на моделях показали, что существование в профиле повышенного водного градиента, позволяло найти оптимальную глубину посева, представляющую компромисс мехду требованиями прорастания и появления всходов. Что-же касается полевых опытов, то во весх тестировавшихся климатических условиях, было доказано превосходство применения сеялки надо всеми другими способами посева в разброс. Но, для применения сеялки необходим хорошо размельченный поверхностный горизонт При посевах в разброс процент всхожести не превышает 50 %. И, очень часто, более глубокие способы посева (заделка семян при помощи маленького плуга) дают лучшие, и наименее зависимые от климатических условий всходы.

Обсуждаются связность полученных розультатов и возможности их практического применения.

Références bibliographiques

ANECHOUM M., 1975. *Etude agronomique du blé dans la région de Larache.* Mémoire de 3e cycle ronéoté. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat.

ARNON I., 1972. *Crop production in dry regions.* Vol. 2, Léonard Hill, Londres.

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., DUBY Camille, 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs grain. Analyse de huit campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, **26** (5), 555-591.

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1976. Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ, **27** (3), 295-325.

BOURGEOIS A., 1975. Résultats d'une enquête agronomique sur la culture du blé dur dans la région d'Azrou. *Hommes, terre et eaux*, **4** (15).

IFRI A., 1975. *Etude sur l'efficacité des engrais azotés pour une culture de blé*. Mémoire de 3e cycle ronéoté. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat.

LELIÈVRE F., PAPY F., 1977. Observation au champ des premiers stades de développement du blé dur en conditions d'alimentation hydrique et azotée déficientes. *C.R. Acad. agric. Fr.* **13,** 879-886.

SEBILLOTTE M., 1974. Agronomie-Agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cah. ORSTOM*, Ser. Biol. 24, 3-25.

SEBILLOTTE M., 1975. Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol ? Essai méthodologique. *Bull. tech. Inf.*, **302-303,** 555-567.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 637-650.

Désordres morphologiques, histologiques et chimiques provoqués par des carences minérales chez *Chrysanthemum morifolium*

G. GILLY

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches d'Antibes, I. N. R. A.,
45, boulevard du Cap, 06602 *Antibes*, B. P. 78

Résumé

Le chrysanthème occupe une place importante dans la production de la fleur coupée dans le Sud-Est de la France. Conduite en ronde annuelle en serre, c'est une culture très intensive. L'horticulteur doit éviter tout déséquilibre de nutrition minérale en cours de croissance et conserver à son sol, son potentiel de production.

En utilisant la technique de culture sur sable avec solutions nutritives, on provoque des carences totales et partielles en N-P-K-Ca-Mg-B. Les carences en azote, potassium, magnésium font apparaître un aspect chlorotique des feuilles, un nombre de fleurs moindre avec des fleurs dissymétriques et d'une faible tenue de vase ; celle en acide phosphorique provoque une sénescence prématurée des feuilles du bas de tige (cliché 1) et les fleurs sont petites, peu nombreuses et à pédoncule court. Le calcium a une action très marquée en carence totale : les apex se nécrosent très tôt (cliché 2). Quant à la carence en bore, elle provoque un « rosetting » (cliché 3).

Les carences minérales affectent la morphologie, la valeur décorative de l'inflorescence et conduisent parfois à des modifications histologiques, très importantes en particulier pour la carence en bore. Une analyse minérale des feuilles du haut de la tige, stade récolte, fournit les seuils critiques de carence.

La culture du Chrysanthème en serre chauffée occupe dans la production horticole de fleurs coupées une place de plus en plus importante dans le Sud-Est de la France. Les conditions particulières des sols et du climat méditerranéen impliquent une adaptation des techniques culturales généralement définies pour des régions plus septentrionales, dans lesquelles ces cultures étaient jusqu'alors localisées.

La méthodologie que nous avons adoptée consiste à placer le végétal dans des conditions de subcarence ou de carence totale en chacun des principaux éléments de la nutrition dans le but de préciser une symptomatologie des carences.

Dispositif expérimental

La variété utilisée est un Chrysanthème « Spider » jaune, var, Luyona. Nous avons utilisé la technique de culture en pots sur sable siliceux inerte, d'une granulométrie comprise entre 1 et 3 mm ; la densité de plantation est de quatre plants par pot. L'alimentation en eau et en éléments minéraux des plants est assurée par un apport journalier de solution nutritive d'une concentration saline totale voisine de 1,5 g/l et de composition variable en fonction des traitements. L'essai comporte onze traite-

ments avec quatre répétitions par traitement : un témoin correspondant à une solution nutritive complète équilibrée et dix traitements dans chacun desquels un des éléments a été, soit réduit de moitié : (traitements : N_1, P_1, K_1, Ca_1, Mg_1), soit supprimé : (traitements : P_0, K_0, Ca_0, Mg_0, B_0), le traitement N_0 ayant été écarté. Les compositions de ces différentes solutions en éléments majeurs sont reportées dans le tableau 1. A l'exception du traitement B_0, qui ne renferme pas de bore, la teneur de ces solutions en oligo-éléments est la suivante (en μg/l) : Fe 800, Mn 200, Cu 50, Mo 50, B 100, Zn 200.

TABLEAU 1

Composition des solutions nutritives des différents traitements en milliéquivalents/litre
(indice 0 : carence totale en l'un des éléments et indice 1 : carence partielle)

	Témoin	N	P		K		Ca		Mg		B
		1	1	0	1	0	1	0	1	0	0
N (NO_3^-).....	8	2	8	8	8	8	6	6	8	8	8
$PO_4H_2^-$.....	1	1	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1
SO_4^{--}.....	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cl^-.....	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K^+.....	5	3	4	4	1	0	5	6	5,5	5	5
Ca^{++}.....	4	4	4	4	7	8	1	0	4	5	4
Mg^{++}	1	1	1	1	2	2	2	2	0,5	0	1

Les jeunes boutures racinées, provenant du circuit commercial, sont placées à raison de quatre boutures par pot en grès, de 25 cm de diamètre, sur substrat sableux, en serre avec photopériode contrôlée. L'éclairement de nuit est intermittent : 10 mn d'éclairement, 20 mn d'extinction, pendant 4 semaines, puis obscurcissement jusqu'à coloration du bouton. La température de nuit de la serre est maintenue à 12 °C.

Tous les plants sont alimentés avec la solution témoin pendant les 2 premières semaines, la différenciation des traitements n'intervient qu'après cette période.

Méthodologie

Sur les plants carencés et demi-carencés, les symptômes sont décrits et photographiés en cours de culture et à la récolte. Des échantillons sont prélevés pour un examen histologique et les analyses minérales. Des mensurations et pesées sont effectuées pour déterminer les variations morphologiques.

Résultats

A. — *Symptômes visuels*

La coloration des feuilles, le nombre et la régularité de fleurs épanouies, la longueur de la tige, la longueur des pédoncules floraux et la tenue en vase, sont autant de facteurs déterminant la qualité du produit récolté. L'inflorescence de la variété Luyona est un corymbe de capitules à fleurs tubulées, à bord délicatement lacéré, donnant à la fleur cet aspect arachnéen de « Spider ».

a) *Tige florale et inflorescence.*

Les carences minérales ont une action peu marquée sur la longueur de la tige (voir tabl. 2), sauf pour la carence totale en calcium. Par contre, ces carences modifient la forme du corymbe. La somme de la longueur des pédoncules floraux (voir tabl. 2) est réduite par une carence partielle en azote, potasse et acide phosphorique, et très réduite par une carence totale en acide phosphorique. La variation de la longueur

TABLEAU 2

Influence des traitements sur la morphologie de la fleur et la tenue en vase
(p. 100 du témoin)

	T	Ca		Mg		N	P		K	
		0	1	0	1	1	0	1	0	1
Nombre de fleurs	100	ND	77	88	88	83	52	70	88	88
Longueur de tige	100	ND	85	86	88	86	90	100	100	96
Somme longueur des pédoncules floraux	100	12	81	70	90	63	34	67	67	71
Tenue en vase (nbre de jours)..	100	ND	80	50	70	75	50	75	50	75

N. D. : non déterminé.

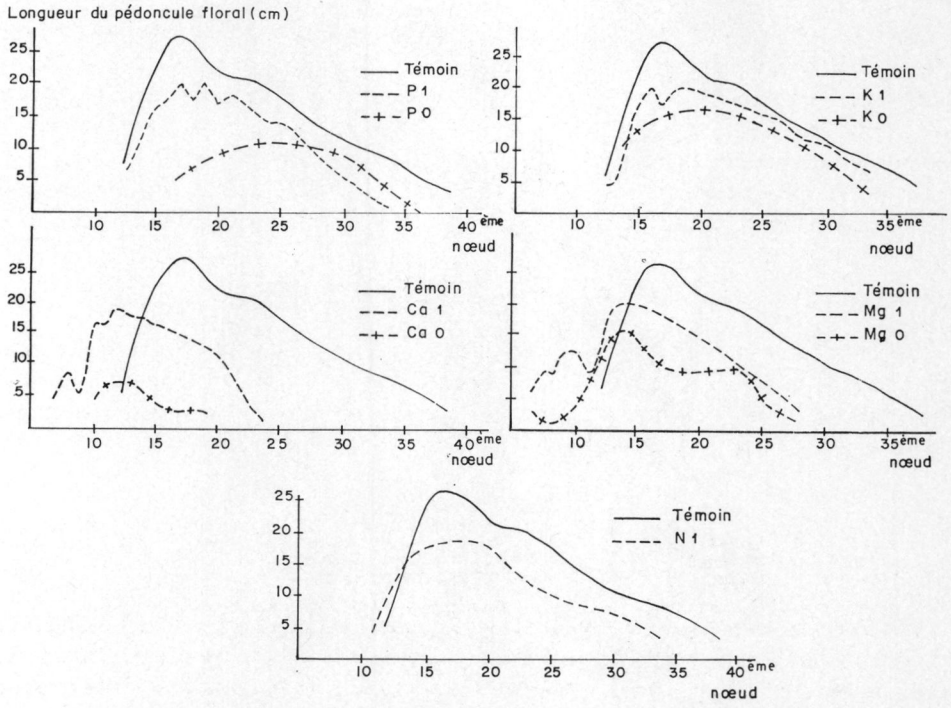


FIG. 1. — *Influence des carences minérales sur la longueur des pédoncules floraux de même rang de nœud sur la tige.*

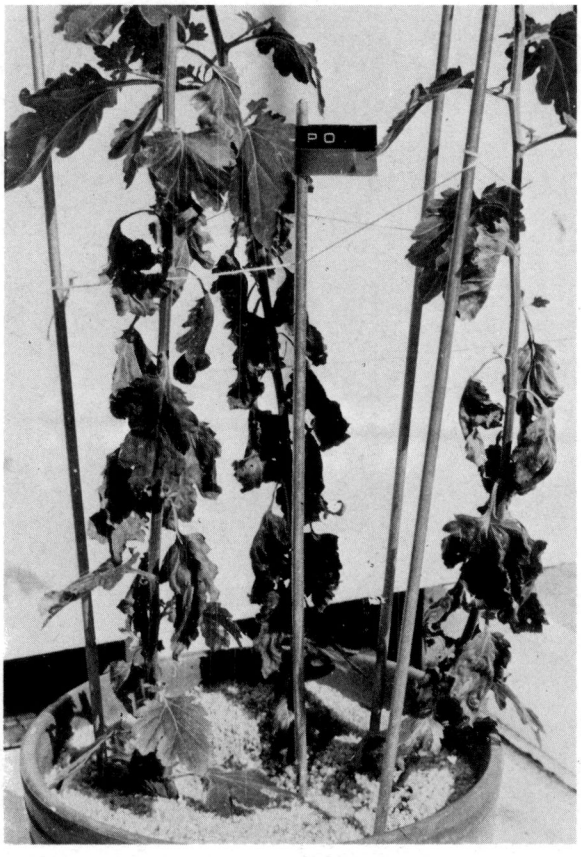
des pédoncules floraux en fonction de leur positionnement sur la tige transforme alors le corymbe en une grappe plus ou moins lâche et irrégulière, pour une carence totale en acide phosphorique (fig. 1) ou en magnésium.

b) *Feuilles et fleurs.*

L'azote : Pour la demi-dose d'azote, il y a peu de symptômes. Tout au plus après l'obscurcissement et à la récolte, on observe une coloration vert pâle et une moindre turgescence des feuilles. La floraison est un peu retardée, les fleurs moins ouvertes mais leur nombre réduit à 82 p. 100 ; la tenue en vase est altérée.

Le potassium : Aucun symptôme n'apparaît pour la demi-dose. Pour la carence totale, les symptômes n'apparaissent que très tard. Sur toutes les feuilles de la tige, on note une teinte jaunâtre généralisée, avec de légères taches ponctuelles au sein du limbe sans localisation définie par rapport aux nervures. En fin de culture, le bord de la feuille prend une coloration brunâtre et les capitules présentent une dissymétrie des fleurs externes.

Le phosphore : A carence partielle, on observe de légères nécroses de la pointe des feuilles, les inflorescences de nombre de fleurs sont réduites. Pour la carence

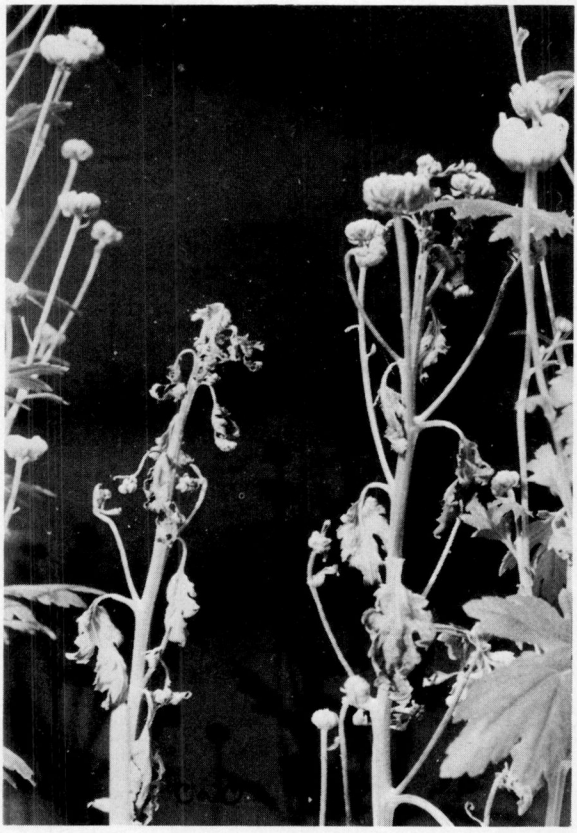


CLICHÉ 1. — *Carence en phosphore.*

totale, après l'obscurcissement, les feuilles du tiers inférieur (sauf les deux feuilles de la base) jaunissent en bordure, allant à un dessèchement du limbe d'abord localisé sur une moitié de la feuille. Puis ces feuilles se dessèchent totalement ; pourtant quand on froisse la feuille, celle-ci ne se craquèle pas. Sur le plant, ces feuilles demeurent attachées à la tige jusqu'à la récolte (cliché 1). Les axillaires de ces feuilles desséchées sont verts et normaux. Les feuilles supérieures de la tige et celles des pédoncules floraux présentent des dessèchements localisés surtout en pointe.

Les fleurs sont malformées, demeurant pour la plupart en bouton. Enfin, lorsque les fleurs ne sont pas récoltées, il apparaît sur la variété Luyona un brunissement des ligules du cœur de la fleur. Il convient de remarquer que le dessèchement des feuilles de la base, très fréquemment observé en serre, est attribué par les chrysanthémistes à un manque de lumière du fait de la forte densité de plantation (64 plants/m^2). Winsor (1969) a observé le même symptôme pour une carence en acide phosphorique.

Le calcium : A carence partielle, les feuilles ont une coloration vert gris avec quelques pointes sèches pour les jeunes feuilles et le nombre de fleurs est réduit à 77 p. 100. A carence totale, 10 j après l'obscurcissement, alors que les feuilles de la base demeurent vertes, on voit apparaître sur les feuilles médianes et supérieures,



CLICHÉ 2. — *Carence en calcium.*

des ponctuations et des plages de dessèchement du limbe, le plus souvent par tâche internervaire et marginale. A l'inverse de ce que l'on observe pour la carence en acide phosphorique, l'aire se craquèle quand on froisse la feuille. Le phénomène va s'accentuant, puis l'extrémité de la tige se dessèche très tôt (cliché 2). Seuls les axillaires médiaux développent un pédoncule dont les feuilles ont des pointes desséchées et dont les fleurs présentent des brunissements des ligules externes. Les feuilles, demeurées vertes, présentent souvent une forme lovée en carène. Les axillaires de la base se développent en donnant chacun plusieurs axes courts et présentent une légère hétérophylie. Les racines adventives ont leur pointe nécrosée. Au centre du chevelu racinaire, de nombreuses racines sont nécrosées alors que d'autres sont parfaitement blanches.

Le magnésium : A carence partielle, le nombre de fleurs est légèrement réduit tandis que l'aspect des feuilles est peu différent du témoin. A carence totale, les feuilles sont dans l'ensemble vert pâle et celles de la base ont de petites taches brunes ponctiformes mais sans dessèchement. 10 j avant la récolte, il se produit un rougeoiement de toute la feuille, en bas de tige ; ce rougeoiement avait été signalé par Messing en 1954, et fait penser au rougeoiement automnal. Les fleurs sont moins ouvertes et plus étagées, c'est-à-dire que la mise à fleur se produit sur des axillaires très bas.

Le bore : Les premiers symptômes apparaissent avant l'obscurcissement. La tige ne s'allonge plus, les entrenœuds du sommet deviennent de plus en plus courts

CLICHÉ 3. — *Carence en bore.*

et la tige s'épaissit (cliché 3). Si l'on fend la tige en deux, le sommet présente une nécrose médullaire semblable à celle décrite pour le « cœur noir » de la betterave. Les feuilles prennent un port vertical rabattu contre la tige et celles du sommet présentent des boursouflures du limbe avec une subérisation localisée de la nervure principale sur la face ventrale de la feuille. Du fait de la contrainte du nanisme sur la tige, les axillaires de base se développent jusqu'à ce que leurs entrenœuds supérieurs se raccourcissent à leur tour.

Après l'obscurcissement, les axillaires du sommet et de la base de la tige fleurissent comme s'il n'y avait pas de carence en bore, c'est-à-dire qu'ils présentent des entrenœuds longs comme tout pédoncule floral, mais au deuxième ou troisième entrenoeuds, il y a de nouveau raccourcissement des entrenœuds, avec ou sans production d'une fleur. Lorsqu'une fleur se forme, elle est normalement constituée, tout au plus les fleurs du centre ont tendance à être ligulées au lieu d'être tubulées. Nous n'avons pas observé de brunissement des fleurs centrales. Le cœur du réceptacle des fleurs présente une nécrose semblable à celle décrite au sommet de la tige.

Le développement des racines semble normal et aux conditions expérimentales données, on ne peut parler d'inhibition de croissance des racines par une carence en bore.

B. — *Symptômes histologiques*

Le symptôme histologique constitue une technique de symptomatologie peu répandue. Pissarek et Finck (1973) ont mis en évidence des changements anatomiques résultant de carence en potasse chez le maïs et le colza. L'appréciation du phénomène est visuelle mais difficilement mesurable ; on note une présence ou une absence, ou bien un indice d'intensité du phénomène et la fréquence d'un indice sur un grand nombre d'échantillons. Notre observation a porté sur l'histologie de la section transversale de tige, pédoncule et pétiole de feuille par la technique de double coloration au rouge congo-vert d'iode.

Avec une demi-carence en azote, les modifications histologiques sont peu nettes.

Une *carence en acide phosphorique* semble avoir peu d'action sur l'histologie. Le cambium subéro-phellodermique fonctionne normalement. Une coupe des pétioles ne renseigne pas sur les causes du dessèchement des feuilles du tiers inférieur de la tige.

Dans le cas d'*une carence en potassium*, le fonctionnement du cambium continu subérophellodermique est très altéré et ne fonctionne que faiblement sous les lenticelles. Dans la racine, les parois cellulaires du parenchyme cortical subissent des altérations, voire une légère lignification.

Pour le *magnésium*, les modifications histologiques sont semblables à celles de la carence en potassium, l'assise subérophellodermique ne fonctionne, dans le bas de la tige, que sous les lenticelles.

Avec *une carence en calcium*, si la base de la tige ne présente aucune modification anatomique, une coupe du sommet de la tige indique que la carence en calcium agit sur la constitution des parois des cellules et particulièrement celles des fibres péricycliques, le tissu se différencie mais se construit mal ; l'absence de coloration verte au vert d'iode indique une moindre lignification. La nécrose terminale de la tige serait ainsi due à un affaissement des tissus conducteurs, des parenchymes médullaire et cortical.

Enfin, dans le cas d'*une carence en bore*, une coupe transversale du bas de la tige montre peu d'altération. Dès le milieu de la tige, on observe un parenchyme médullaire très altéré avec des amas de cellules difformes dont les membranes demeurent cellulosiques. L'accroissement en épaisseur de la tige s'effectue normalement par division du cambium libéroligneux mais les cellules formées demeurent à l'état de parenchyme secondaire cellulosique et ne se différencient pas. Au sommet de la tige l'anarchie est encore plus grande et se manifeste jusque dans le parenchyme cortical et les faisceaux libéro-ligneux. Le pédoncule floral, quand il se forme, n'échappe pas à cette anarchie cellulaire, pas plus que le pétiole des feuilles. Dans le limbe foliaire, il n'y a pas de distorsion dans le tissu palissadique, ni le tissu lacuneux ; par contre, les faisceaux conducteurs sont très perturbés avec lignification (et non pas subérisation) des cellules épidermiques et sous-épidermiques de la face ventrale à hauteur des cordons vasculaires.

Les racines présentent aussi cet aspect anarchique dans le cordon vasculaire et le parenchyme cortical ; c'est l'endoderme qui est le plus méconnaissable.

C. — *Composition minérale*

a) *Distribution des éléments minéraux dans les différentes parties de la plante.*

L'action des différents éléments de la fertilisation peut être étudiée en analysant la distribution des éléments minéraux dans les différentes parties de la plante.

A la récolte, les plants ont été échantillonnés de la façon suivante :

1) les sept fleurs supérieures,
2) les autres fleurs restant et les boutons floraux,
3) la portion de la tige portant les pédoncules floraux,
4) les pédoncules floraux,
5) les feuilles du haut dont les axillaires ont donné chacun un pédoncule floral et une fleur,

TABLEAU 3

Composition minérale des différentes parties de la plante témoin (p. 100 de matière sèche). Pour la signification des n° 1 à 9 : voir le texte

	Poids sec g	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
				en p. 100 M. S.					en p. p. m.		
1	3,8	2,17	0,35	4,4	0,73	0,19	65	43	10	86	34
2	5,5	2,04	0,33	4,3	0,61	0,17	54	54	8	137	33
3	2,3	0,93	0,21	1,9	0,42	0,04	26	26	tr	38	14
4	2,0	2,80	0,38	4,4	1,00	0,13	51	37	tr	99	18
5	1,9	4,11	0,27	6,4	2,10	0,22	150	98	5	556	37
6	2,7	0,76	0,24	1,6	0,37	0,03	16	21	8	17	12
7	1,3	3,60	0,33	6,7	2,7	0,30	194	129	16	388	24
8	0,7	3,61	0,39	6,4	1,5	0,27	236	86	21	232	31
9	2,0	2,21	0,10	4,7	1,5	0,20	2 550	223	74	664	9

6) la portion de la tige dont les feuilles ne portent que des axillaires végétatifs,
7) les feuilles du bas à axillaire végétatif,
8) les axillaires végétatifs,
9) les racines.

Ce découpage correspond à une réalité morphologique et physiologique, car lors du développement de la plante, on distingue nettement une partie qui est, et restera, végétative avant l'obscurcissement, et une partie qui est, et deviendra, générative pendant et après l'obscurcissement.

Au tableau 3 sont reportés, pour le plant témoin, les poids secs, les teneurs en N, P, K, Ca et Mg de chacun de ces échantillons ; la répartition centésimale de ces éléments entre les diverses parties de la plante est donnée dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Répartition dans la plante témoin des différents éléments (en p. 100 du total)

	Poids sec	N	P	K	Ca	Mg
1 + 2 + 4 inflorescence..	51	52	47	52	37	53
3 + 6 tige	23	9	14	10	9	6
5 + 7 + 8 feuilles	17	30	15	27	40	29
9 racines	9	9	24	11	14	12

Les fleurs, par leur masse importante (51 p. 100 du poids sec du plant), contiennent la moitié des éléments N, P, K, Mg de la plante, c'est dire l'importance de ces éléments mais encore leur migration, au cours du développement, vers les fleurs. Le rapport équivalentaire : $\frac{Ca + Mg}{K}$ est de 0,91 dans les feuilles du haut et 0,93 dans celles du bas.

Fer et manganèse sont surtout présents dans les parties vertes. Les teneurs en cuivre sont faibles, sauf dans les axillaires (cf. tabl. 3).

TABLEAU 5

Influence d'une carence ou subcarence en un des éléments nutritifs étudiés sur la composition des feuilles du haut du plant (stade récolte)

Traitement	Témoin teneur moyenne	N	P		K		Ca		Mg		B
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Azote p. 100..	3,1	2,6	2,3	3,3	2,3	2,9	3,9	4,0	1 3	1,8	—
P	0,22	0,29	0,07	0,22	0,41	0,29	0,34	0,36	0,14	0,23	—
K	5,00	4,6	4,3	4,7	0,18	1,5	6,9	6,8	2,5	5,8	—
Ca.....	1,6	1,5	1,2	2,0	3,9	3,5	0,23	0,74	0,62	1,9	—
Mg	0,19	0,14	0,14	0,22	0,87	0,56	0,76	0,30	0,02	0,09	—
Bore ppm	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5

TABLEAU 6

Résumé des symptômes et valeurs de la composition minérale des feuilles

Carence en	Symptômes					Composition minérale
	Morphologiques			Histologiques		Feuille du haut Teneur en p. 100 M. S.
	Feuilles	Fleur (capitule)	L'inflorescence	Tige	Racine	Seuil de carences
Azote	Coloration vert pâle perte de turgescence	Floraison retardée. Fleurs moins ouvertes	L'ombrelle présente un léger bombement du centre	néant	néant	2,60
Acide phosphorique	Jaunissement en bord des feuilles du bas, puis dessèchement par moitié du limbe et dessèchement total	Fleurs mal formées, puis en vase brunissement du cœur de la fleur	Inflorescence en grappe avec fleurs étagées	néant	néant	0,07 0,23
Potassium	Teinte jaunâtre de l'ensemble des feuilles avec taches brunes au sein du limbe, puis coloration brunâtre au bord des feuilles	Dissymétrie des fleurs	Inflorescence en grappe	*Tige* : Activité réduite du cambium subéro phellodermique *Racine* : Altération du parenchyme cortical		0,18 1,56
Calcium	Ponctuations et dessèchement du limbe internervaire et marginale. Forme carénée des feuilles inférieures	Brunissement des ligules externes	Inflorescence en ombelle irrégulière	Dessèchement de l'extrémité de la tige par non-lignification des tissus de soutien		0,23 0,74
Magnésium	Feuillage vert pâle sur feuilles du bas, petites taches brunes ponctiformes, 10 j avant récolte : rougeoiement de la face dorsale des feuilles du bas	Fleurs moins ouvertes mise à fleur sur des axillaires très bas	Inflorescence en grappe très irrégulière	L'assise subérophéllodermique ne fonctionne que sous les lenticelles		0,02 0,09
Bore	Avant obscurcissement, raccourcissement des entre-nœuds et « cœur brun » de l'apex émission de tiges secondaires en bas de tige	Les fleurs du centre du capitule deviennent ligulées au lieu de rester tubulées	Absence de grappe. Fleurs rares mais pédoncule à allongement normal	Différenciation anarchique dans la tige, racine et feuille du parenchyme médullaire et du faisceau libéroligneux		5

b) *Influence des différents traitements sur la composition minérale des feuilles du haut de la plante.*

Nous retiendrons les « feuilles du haut » (celles dont les axillaires ont développé un pédoncule floral) au stade récolte. Au tableau 5 se trouvent les valeurs obtenues pour les traitements à carence partielle et totale. Nous pensons que les teneurs, pour la carence partielle, constituent un seuil critique à ne pas dépasser en valeur inférieure.

La teneur en P, K, Ca, Mg pour les traitements zéro s'explique par le fait que les traitements ne sont appliqués que 2 semaines après plantation.

Plante à croissance rapide et sans organe de réserve, le Chrysanthème réagit à des degrés divers à une carence et une subcarence en éléments minéraux qui peuvent être le fait : soit d'un sol déséquilibré, soit d'un plan de fertilisation mal calculé. Nous savons combien l'interprétation d'une analyse végétale est délicate par les interactions qui existent entre les différents éléments. De même que les symptômes provoqués par une carence en potassium ou en magnésium, en acide phosphorique ou en calcium, n'apparaissent qu'en fin de culture, c'est-à-dire trop tard, de même en histologie, les troubles anatomiques apparaissent lorsque la carence s'est déjà extériorisée, visible en symptôme. Néanmoins, nous pensons que la confrontation d'un examen visuel histologique, morphologique, analytique, s'il ne peut sauver une récolte, permet dans une large mesure d'expliquer les difficultés que rencontre l'horticulteur et, avec une analyse de sol, de redresser ses habitudes culturales et lui assurer par la suite des récoltes satisfaisantes. Au tableau 6, se trouvent rappelés les symptômes et les valeurs analytiques pour une carence en N, P, K, Ca, Mg, B.

Conclusion

Le Chrysanthème, pour la fleur coupée en serre, constitue une culture assez répandue dans notre région méditerranéenne.

Monoculture intensive, dans une production en ronde annuelle (trois rotations par an), la plante effectue son cycle végétatif très rapidement en tout moment de l'année. Il faut donc maîtriser d'une façon parfaite les facteurs de température et de lumière, mais aussi de nutrition minérale.

L'observation des symptômes visuels, l'examen histologique, les mensurations morphologiques et l'analyse chimique du végétal permettent de contrôler si l'absorption des éléments majeurs, la distribution de ces éléments dans la plante sont satisfaisantes.

Si les symptômes d'une carence en azote sont peu visibles, la teneur en azote des feuilles est un excellent test.

Dans le cas d'une carence en acide phosphorique, les symptômes visuels se manifestent d'une façon nette par un dessèchement des feuilles du bas de la tige.

La carence en potassium ou en magnésium, outre leur interaction sur la nutrition azotée, aurait une action sur la subérisation du bas de la tige, la mise à fleur des axillaires de la tige principale et la construction de la fleur.

Une carence en calcium perturbe le développement de la plante par une mauvaise lignification des tissus de soutien.

Enfin, dans une carence en bore, dès le stade végétatif, le port vertical des feuilles est très caractéristique ; on retrouve le symptôme de « rosetting » décrit pour d'autres espèces.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

Morphological, histological and chemical disorders due to mineral deficiencies in Chrysanthemum morifolium

The chrysanthemum plays an important part in the production of cut flowers in the south-east of France. It is grown under greenhouses in yearly cycles as a very intensive culture. The horticulturist must avoid any lack of balance in mineral nutrition during the plant growth and maintain the soil production potential.

By applying the technique of sand culture with nutritive solutions a total or partial lack of N-P-K-Ca-Mg-B is induced. The lack of nitrogen, potassium and magnesium causes a chlorotic appearance of the leaves, a lesser number of flowers with asymmetrical ones and a deficient behaviour in vases ; a lack of phosphoric acid induces an untimely senescence of the leaves of the lower stem (plate 1) and the flowers are small, few and have a short peduncle. Calcium has a very marked influence in case of total deficiency : the apex become cankered very soon (plate 2). A lack of boron induces a « rosetting » (plate 3).

Mineral deficiencies affect the morphology, the ornemental value of the inflorescence and sometimes lead to histological modifications, and very important ones in particular in case of boron deficiency. A mineral analysis of the leaves of the upper stem, at crop stage, gives the critical deficiency thresholds.

Zusammenfassung

Morphologische, histologische und chemische, von mineralmängeln bedingte Störungen in Chrysanthemum morifolium

Die Chrysantheme spielt eine wichtige Rolle bei der Produktion von Schnittblumen südöstlich Frankreichs. Sie ist einer sehr intensiven Kultur unterworfen, die im jährlichen Kreis im Gewächshaus geführt ist. Der Gärtner muss jeder Gleichgewichtsstörung der Mineralernährung während des Wachstums ausweichen und die Leistungsfähigkeit des Bodens erhalten.

Mit der Technik der Sandkultur mit Nährlösungen werden Gesamt- oder Teilmangel an N-P-K-Ca-Mg-B hervorgerufen. Die Mängel an Stickstoff, Kalium und Magnesium erzeugen ein bleichsüchtiges Aussehen der Blätter, eine kleinere Menge von Blumen mit unsymmetrischen Blumen und eine schwache Beständigkeit in Vasen ; ein Mangel an Phosphorsäure bewirkt ein Frühaltern der Blätter am unteren Teil des Stengels (Platte 1) und die Blumen sind klein, wenig und haben einen kurzen Blütenstiel. Das Kalzium hat einen sehr ausgeprägten Einfluss im Falle von Gesamtmangel : die Spitzen sterben sehr früh ab (Platte 2). Der Mangel an Bor bewirkt ein « rosetting » (Platte 3).

Die Mineralmängel beeinflüssen die Morphologie, den Dekorationswert des Blütenstands und veranlassen manchmal histologische Änderungen, die insbesondere im Falle von Bormangel sehr wichtig sind. Eine mineralische Analyse der Blätter im oberen Teil des Stengels, Erntestufe, ergibt die kritischen Mangelschwellen.

РЕЗЮМЕ

Морфллогические, гистологические и химические нарушения вызванные минеральным гооданиемо у хризантемы (*chrysanthemum morifolium*).

Г. ЖИЛЛИ.

Хризантема занимает очень важное место в цветоводческой продукции юго-востока Франции. Культура этого цветка очень интенсивна и ведется круглый год в оранжереях. Цветовод поставлен в необходимость избегать неуравновешенности минерального питания в течении роста растений и в то-же время сохранять потенциал продуктивности почвы.

В опытах применялась методика песчанных культур с питательными растворами и вызывались полные или частичные голодания И, Р, К, Са, M_g, и В. При азотной, калиевой и магниевой недостаточностях листья принимают хлоротический вид, у цветов появляются ассиметричности, число цветов уменьшается и укорачивается срок их жизни в вазах ; фосфорное голодание вызывает преждевременное старение нижних листьев растения (фотогр. И° 1), уменьшение числа и размеров цветов и укорочение цветоносов. Кальциевое голодание действует очень сильно, особенно при полном отсутствии этого элемента : апекс растений очень быстро омертвляется (фотогр. И° 2). Что-же касается борной недостаточности — она вызывает розеточность (фотогр. И° 3).

Всякая минеральная недостаточность действует на морфологию растения, уменьшая декоративную ценность соцветия и приводя очень часто к очень сильным гистологическим изменениям, в особенности недостаточность борная. Минералогический анализ верхних листьев растения, сорванных во время сбора цветов, доставляет сведения о критических порогах недостаточностей.

Références bibliographiques

ASEN Sam *et al.*, 1953. Foliar absorption and translocation of ^{32}P by *Chrysanthemum morifolium*. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **62,** 465-469.

BOODLEY J. W., MEYER M., 1965. The nutrient content of Bonnaffon Delue Mums from juvenile to mature growth. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **87,** 472-478.

BRANSON R. L., SCIARONI R. H., RIBLE J. M., 1968. Magnesium deficiency in cut flower chrysanthemum. *Florists' Review*, **143,** 66-67, et **144.**

CHAN A. P., 1955. Some factors affecting flower bud development of chrysanthemum. 14° *Int. Hort. Congrès*, 1023.

GILLY G., 1974. La fertilisation du chrysanthème fleur coupée. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 983-987.

GOOD G. L., TUKEY H. B., 1967. Redistribution of mineral nutrients in *Chrysanthemum morifolium* during propagation. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **90,** 384-388.

JOINER JASPER N., SMITH T. C., 1962. Effects of nitrogen and potassium levels on the growth, flowering reponses and foliar composition of *Chrysanthemum morifolium* « Blue Chip ». *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **80,** 571-580.

JOINER JASPER N., 1967. Effects of P, K and Mg levels on growth, yield composition of *Chrysanthemum morifolium*, Indianapolis. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **90,** 389-396.

JOINER JASPER N., POOLE R. T., 1967. Relationship of fertilisation frequency to chrysanthemum yield and nutrient levels in soil and foliage. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **90,** 397-402.

LUNT D. R., KOFRANEK A. M., 1958. Nitrogen and potassium nutrition of chrysanthemum. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **72,** 487-497.

LUNT O. R. *et al.*, 1960. Influence of certain environmental conditions on the salinity tolerance of *Chrysanthemum morifolium*. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **75,** 676-687.

MASTALERZ J. W., 1955. Soil nitrate levels, light intensity growing temperature and the quality of cut flowers stored at 31°. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **65,** 483-492.

MESSING J. H. L., OWEN O., 1954. The visual symptoms of some mineral deficiences on chrysanthemum. *Plant and soil*, **5,** 101-120.

MEYER M. M., BOODLEY J. W., 1964. Foliar applications of nitrogen phosphorus and potassium to chrysanthemum and poinsettia. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **84,** 582-587.

MEYER M. M., BOODLEY J. W., 1964. Interaction application N foliaire N racines, in the growing of *Chrysanthemum morifolium*. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **85,** 564-567.

PISSAREK H. P., FINCK A., 1973. Etudes sur le diagnostic anatomique microscopique de la carence latente en potassium. *Revue de la Potasse*, Section 5, n° 3.

WATERS W. E., 1964. The effects of soil mixture and phosphorus content of *Chrysanthemum morifolium*. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **85**, 588-593.

WATERS W. E., 1965. Influence of nutrition on flower production keeping quality, disease susceptibility, and chemical composition at different growth stages of *Chrysanthemum morifolium*. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **91**, 625-632.

WINSOR G. W., MASSEY D. W., WINSOR G. W., 1969. Nutrition of year round chrysanthemum in peat and sand. *Littlehampton Annual report* 1969, 90-92 et 93-94.

WOLTZ S. S., 1956. Studies on the nutritional requirement of chrysanthemum. *Roc. Fla. State Hort. Soc.*, **69**, 253-356.

WOLTZ S. S., WATERS W. E., 1967. Effects of storage lighting and temperature on metabolism and keeping quality of *Chrysanthemum morifolium* cut flowers relative to nitrogen fertilisation. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **91**, 633-644.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 651-659.

Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau

I. — Aspects méthodologiques.

J. LE RENARD

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal D_H en milieu poreux homogène saturé en eau est décrite en détail. Elle permet une reproductibilité meilleure que 1 p. 100. Dans cette première partie, est présenté l'appareillage expérimental à utiliser, ainsi que le mode opératoire, permettant d'obtenir sous la forme optimale l'information expérimentale nécessaire au calcul de D_H. Le mode de calcul, s'appuyant sur deux modèles différents, sera développé dans les parties II et III.

Nous avions précédemment présenté (Le Renard *et al.*, 1977) différentes méthodes de détermination en laboratoire du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal D_H. Il est apparu souhaitable d'apporter des améliorations à celle des méthodes que nous avions reconnue la mieux adaptée, afin de pouvoir proposer dans le détail une méthode donnant des résultats reproductibles et précis à partir d'expériences faites sur un dispositif aussi peu complexe que possible.

Dans une première partie, nous décrirons l'aspect méthodologique de l'obtention des courbes d'élution et des paramètres expérimentaux associés ; l'appareillage nécessaire y sera décrit en détail, et les points les plus critiques du mode opératoire seront précisés.

Une deuxième partie explicitera un modèle mathématique relativement simple permettant de déterminer les paramètres de la dispersion hydrodynamique (D_H, et $\bar{v}$ = vitesse moyenne dans les pores) ; en s'attachant plus particulièrement à la détermination de D_H, nous discuterons la sensibilité de cette détermination aux différentes erreurs qui peuvent être commises, que ce soit lors de l'expérience, lors du traitement mathématique ou même lors de la confection du milieu poreux (reproductibilité du milieu).

Cette deuxième partie montrera que l'on atteint et l'on dépasse même dans certains cas les limites du domaine d'applicabilité du modèle physique utilisé pour l'interprétation du phénomène de dispersion, ce qui conduira dans une troisième partie à utiliser un autre modèle mathématique, traduction d'un modèle physique plus compliqué, mais qui, si nécessaire, est à même de permettre une détermination plus rigoureuse du coefficient D_H.

Enfin, pour en faciliter la mise en œuvre, nous exposerons dans une dernière partie des exemples d'application de cette méthode, ainsi que des remarques et commentaires à son sujet.

I. — Aspects méthodologiques

Rappelons simplement que, le coefficient de dispersion hydrodynamique D_H constituant l'une des informations essentielles contenues dans la donnée d'une courbe d'élution expérimentale, il ne peut être déterminé que par ajustement à cette courbe d'un modèle mathématique ; ce dernier n'est que la traduction du modèle physique d'interprétation du phénomène de la dispersion hydrodynamique dans les conditions étudiées. Une détermination précise de D_H implique donc d'une part que l'on sache interpréter correctement l'aspect phénoménologique de la dispersion d'un soluté, d'autre part que l'on sache obtenir une courbe d'élution dans des conditions expérimentales suffisamment rigoureuses. Le problème qui se pose dans chaque cas est de savoir ce qui est suffisant si l'on veut parvenir à un niveau donné de confiance sur la détermination de D_H.

Dans l'étude déjà citée, nous avons comparé les résultats donnés par différents modèles, associés à deux types d'expériences. Nous avons retenu ici le plus satisfaisant de ces modèles, qui consiste en la résolution de l'équation différentielle classique de la dispersion pour des conditions aux limites traduisant une fonction d'alimentation de la colonne (de longueur « infinie ») de type impulsion en concentration. La pratique de la méthode expérimentale correspondante nous a montré que, dans le cas du milieu poreux soumis à l'étude (sable de Fontainebleau), on pouvait en milieu saturé espérer obtenir D_H avec une précision meilleure que 10 p. 100 (reproductibilité meilleure que 1 p. 100), dès lors que l'on respecte au cours de l'expérience un certain nombre de conditions que nous allons détailler, et qui trouveront leur justification par la suite lors de l'exploitation mathématique de la courbe d'élution (dans les parties suivantes de l'article).

A. — *Principe de l'expérience*

L'expérience est conçue en fonction du modèle d'interprétation qui lui sera appliqué. Ce modèle comporte comme conditions initiales et aux limites, en désignant par C(x, t) la concentration dans la colonne de milieu poreux à une distance x de l'extrémité-amont de la colonne et au temps t :

$$C(x \geqslant 0,\ t_0) = C_0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} C(x = 0,\ t_0 < t \leqslant t_m) &= C_e \\ C(x = 0,\ t > t_m) &= C_0. \end{aligned} \tag{2}$$

La condition (1) exprime qu'au temps initial $t = t_0$ la colonne est saturée par une solution contenant la soluté traceur à une concentration initiale C_0 (que l'on choisit généralement nulle). Les conditions (2) indiquent que la colonne est alimentée par une solution du traceur de concentration égale à C_0 sauf pendant un certain intervalle de temps compris entre t_0 et t_m où sa concentration prend une valeur C_e différente de C_0 ; c'est donc la méthode dite de l'impulsion, dans laquelle la courbe d'élution a la forme d'un pic, dit pic d'élution (fig. 1).

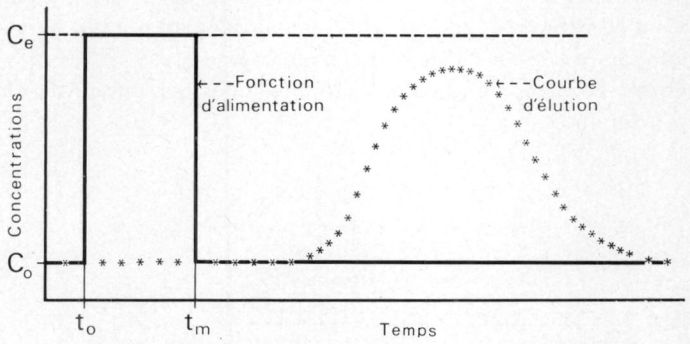


FIG. 1. — *Fonction d'alimentation et courbe d'élution correspondante.*

Le modèle, bien évidemment, suppose que la valeur du coefficient D_H est unique tout au long de l'expérience. Comme D_H dépend lui-même de la vitesse moyenne $\bar{v}$ du soluté dans les pores, et, comme cette vitesse est déterminée par le débit Q qui traverse la colonne, il faudra que Q reste constant ; nous reviendrons en détail sur ce point important, à cause de ses implications tant sur le plan de la conception de l'expérience que sur la notion même de régime permanent.

La concentration C(L, t) mesurée est celle de l'effluent de la colonne de longueur L, à l'instant t. Suivant le soluté utilisé, elle peut être mesurée soit en continu à la sortie de la colonne, soit après échantillonnage de l'effluent à des temps donnés grâce à un collecteur de fractions.

B. — *Montage expérimental*

Il dérive directement du principe ci-dessus ; il est représenté dans le cas d'une détermination de la concentration de l'effluent à intervalles de temps constants. Il est essentiellement constitué, outre la colonne, par la pompe d'alimentation à deux canaux, par le dispositif dit de purge et par les deux circuits indépendants d'alimentation (solution A à la concentration C_0 et solution B à la concentration C_e).

Le montage est représenté sur la figure 3, où seul le circuit d'alimentation en solution A est figuré, le circuit B lui étant analogue. Le fonctionnement du montage est montré pour trois phases principales du mode opératoire (qui sera décrit au paragraphe C).

1. — *La colonne.*

En plexiglass, elle comporte un corps et deux embouts, l'assemblage étant rendu étanche par deux joints toriques. L'embout aval comporte une cavité en cônes emboî-

tés (un cône central entouré de deux anneaux à section triangulaire), communiquant par l'intermédiaire de sept orifices avec le tuyau d'écoulement de l'effluent ; il comporte donc un inévitable « volume mort de sortie », mais la forme conique de la cavité permet une évacuation rapide des bulles d'air lors du remplissage. Notons que la position des orifices et le dessin de la cavité sont tels que les débits des sept orifices doivent être égaux.

L'embout amont comporte une cavité conique simple. Il est percé d'une série de six trous périphériques permettant le branchement de tuyaux, trois pour l'arrivée du soluté (trous d'alimentation) et trois (plus un trou central) pour la purge du volume mort d'alimentation (dû à l'existence de la cavité conique).

Les extrémités du corps de la colonne sont fermées par une grille-amont et une grille-aval en acier inox.

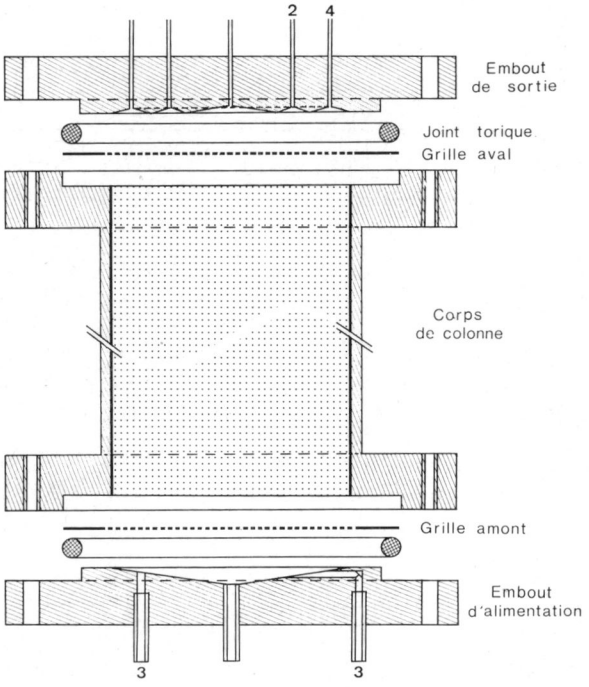


FIG. 2. — *Colonne, démontée, en coupe longitudinale à l'échelle* 0,5.

Les nombres indiqués sont ceux des tubes de connexion situés à égales distances sur le cercle de diamètre correspondant. Les trois tubes extérieurs sur l'embout d'alimentation sont reliés à la sortie du robinet à cinq voies ; les quatre tubes intérieurs (dont le tube central) sont reliés à la seringue de purge. Les sept tubes sur l'embout de sortie sont reliés au collecteur de fractions.

2. — *Le système de purge.*

Il est en effet nécessaire, aux temps $t = t_0$ et $t = t_m$, de remplacer totalement la solution contenue dans le volume mort d'alimentation par une solution de concentration différente. Pour cela, après avoir changé le circuit d'alimentation de la colonne, on aspire par les trous de purge au moyen d'une seringue un volume de la nouvelle

solution tel que l'on soit assuré d'avoir déplacé toute l'ancienne. Ceci est obtenu pour un volume aspiré de l'ordre de cinq fois le volume mort d'alimentation.

Notons que le système de purge adopté, par aspiration, permet de n'avoir qu'une seule seringue pour toutes les purges, mais a l'inconvénient de soumettre toute la colonne à une dépression, ce qui provoquerait la pénétration de bulles d'air à l'intérieur du milieu poreux si la colonne n'était pas hermétiquement close.

3. — *Les circuits d'alimentation.*

Il existe deux circuits indépendants, l'un pour la solution A, l'autre pour la solution B. Chaque circuit consiste essentiellement en un tuyau branché d'un côté à la colonne et de l'autre, par l'intermédiaire de l'un des canaux de la pompe, à l'un des réservoirs de solution. De plus sur ce circuit de base a été ajouté un vase d'expansion constitué par un tube vertical ouvert à son sommet à l'air libre, de façon à absorber les petites variations rapides de débit dues à la nature péristaltique de la pompe utilisée.

Le circuit de la pompe est rebouclé sur lui-même par un tuyau de retour, lorsque c'est le circuit d'alimentation en l'autre solution qui est branché sur la colonne. Ce système permet de laisser la pompe tourner sans interruption même pendant que la circulation dans la colonne est arrêtée, ce qui permet d'obtenir une grande régularité de la vitesse de rotation de la pompe dès lors que cette vitesse s'est stabilisée.

Un tuyau a en outre été ajouté, permettant de relier directement la colonne au réservoir, et est utilisé lors des purges. Chaque circuit comporte enfin un robinet de trop-plein permettant de baisser rapidement le niveau dans le tube vertical d'expansion ; nous verrons son utilité dans le mode opératoire.

Notons que le branchement sur la colonne des tuyaux d'alimentation (un pour les purges et un pour la pompe, pour chacun des deux circuits d'alimentation) peut se faire par un robinet à quatre positions (permettant de sélectionner une voie parmi quatre), dit robinet à cinq voies.

C. — *Mode opératoire*

1. — *Phase de préparation* (fig. 3-1).

Avant toute obtention d'une courbe d'élution, il faut s'assurer de deux points : que le fluide dans toute la colonne soit bien à la concentration C_0 ; et que la pompe ait atteint une vitesse de rotation constante correspondant bien au débit que l'on désire obtenir. Pour s'assurer de tout cela, on fait circuler la solution A, et l'on mesure la concentration de l'effluent qui doit être égale à C_0 ; on mesure également de temps en temps le débit pour s'assurer qu'il s'est bien stabilisé à la valeur désirée (le débit doit rester constant à 1 p. 100 près au cours d'une expérience). Il faut aussi s'assurer que les deux canaux de la pompe donnent bien le même débit au travers de la colonne. A chaque débit stabilisé correspond une certaine hauteur de charge hydraulique, visible dans le tube vertical d'expansion et que l'on prendra soin de repérer sur ce tube (niveau N).

2. — *Phase de la purge par la solution B.*

Le début de l'impulsion se fait par le branchement du robinet à cinq voies vers la direction « purge par B », la mise en boucle du circuit de la solution A, et la réalisation

de la purge. Cette opération est analogue à celle qui sera décrite ci-après au paragraphe 4 et figurée (fig. 3-4) : les circuits A et B jouent un rôle symétrique dans les deux sortes de purge.

3. — *Phase de l'impulsion* (fig. 3-3).

Entre les temps t_0 et t_m, la solution B circule au travers de la colonne ; le circuit A est rebouclé sur lui-même. Le collecteur de fractions et le chronomètre sont déclenchés à l'instant t_0 du début de cette phase.

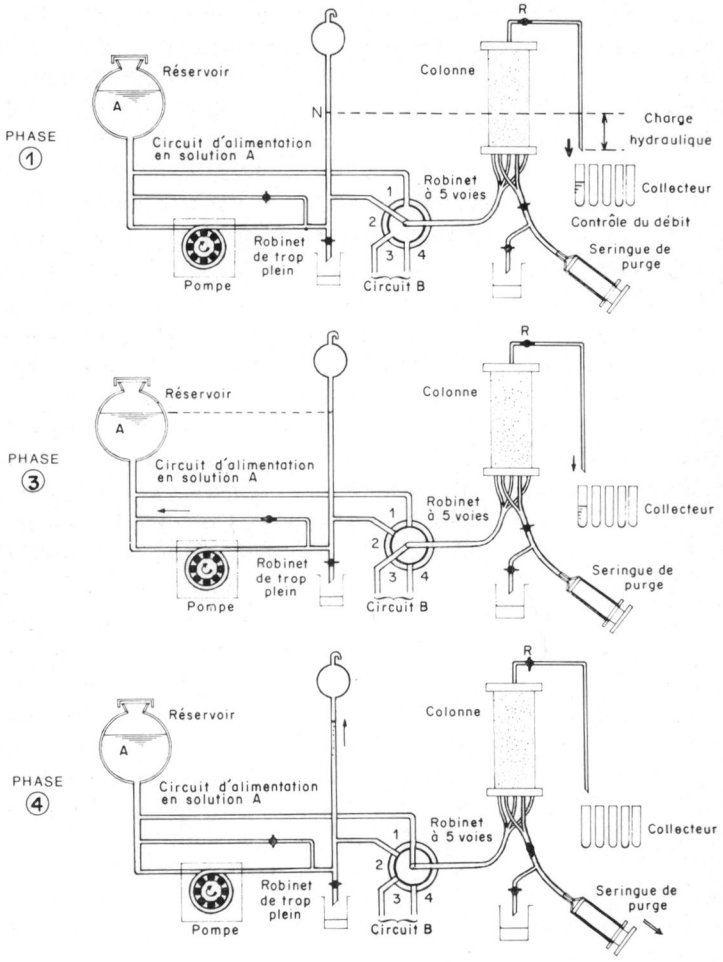


FIG. 3. — *Montage expérimental et mode opératoire.*

Les phases indiquées sont celles détaillées dans le texte.
Le circuit d'alimentation en solution B n'est pas dessiné.

Le robinet à 5 voies permet de brancher la colonne sur :

— le circuit de purge par la solution A (position 1) ;
— le circuit de la pompe (canal A) (position 2) ;
— le circuit de la pompe (canal B) (position 3) ;
— le circuit de purge par la solution B (position 4).

4. — *Phase de la purge par la solution A* (fig. 3-4).

Au temps t_m où doit se terminer l'impulsion, on ferme le robinet R, on arrête le chronomètre, on reboucle le circuit B sur lui-même, on branche le robinet à cinq voies sur la position « purge par A » et l'on réalise la purge. Pour cela, on referme le robinet qui mettait en boucle le circuit A, ce qui provoque une montée du niveau de A dans le tube vertical d'expansion (au-dessus du niveau du réservoir en A) ; on aspire alors rapidement avec la seringue de purge la solution A au travers du volume mort d'alimentation. Pour rétablir la circulation au travers de la colonne, on commence par faire redescendre le niveau de A au-dessous de N (de quelques centimètres) en actionnant le robinet de trop-plein en A ; on tourne le robinet à cinq voies vers « pompe A », et l'on attend pour rouvrir R que le niveau de A atteigne le niveau N : le débit se rétablit alors immédiatement à sa valeur stable. La purge étant terminée, on remet en marche le chronomètre, et l'on prend soin de vider la seringue de purge.

5. — *Phase des prélèvements* (fig. 3-1).

La configuration est exactement la même que pour la phase de préparation. On prélève avec le collecteur de fractions la solution effluente ; on arrête le prélèvement lorsque la concentration de l'effluent est retombée à la valeur C_0, à la fin de la sortie du pic d'élution. Au cours de cette phase, on mesure de temps à autre le débit pour s'assurer de sa constance ; l'emploi d'un chronomètre automatique relié au collecteur de fractions est pour cela recommandable, dès lors que l'on fait des prélèvements à volume constant (par compteur de gouttes ou mieux par siphon).

Notons ici que les concentrations déterminées sur des fractions sont des moyennes sur un certain intervalle de temps Δt (égal à l'intervalle entre les prélèvements de deux fractions successives), et qu'il faudra en tenir compte dans les calculs ultérieurs.

Lors des expériences, les solutions A et B doivent être soigneusement dégazées, et les circuits d'alimentation tout comme la colonne doivent être exempts de bulles d'air, puisqu'on s'intéresse aux caractéristiques dispersives du milieu poreux à l'état saturé. On veillera en particulier à ne pas utiliser certains tuyaux perméables aux gaz. Ces précautions prises, les circuits restant toujours remplis de liquide, les seuls risques de voir entrer de l'air dans la colonne ne pourraient résulter que d'erreurs de manipulation (en particulier lors des purges : si l'on a oublié de fermer le robinet R, ou si l'on aspire la purge par le circuit-pompe, ce qui fait pénétrer de l'air par le tube d'expansion ; ou si l'on inverse par mégarde le sens de circulation dans la colonne en appliquant une charge hydraulique négative).

D. — *Opérations annexes*

1. — *Expérience de l' « impulsion nulle ».*

Pour tenter de tenir compte du fait que la durée des purges n'est pas négligeable (donc qu'il se produit inévitablement une diffusion au travers de la grille amont de la colonne durant le temps où la circulation au travers de la colonne est coupée), on peut procéder à une expérience analogue aux précédentes mais où, en théorie, on n'injecte pas de solution B dans la colonne.

Pour cela, on procède comme précédemment, mais en supprimant la phase de

l'impulsion 3. L'expérience se résume donc en deux purges consécutives suivies de la phase des prélèvements (avec un certain débit Q). La courbe d'élution devrait, si les purges étaient idéales, être complètement plate : $C(L,t) = C_0$. On observe en fait un pic d'élution très aplati, dû à l'existence d'une diffusion pendant la durée des purges, et à l'entrée inévitable d'une petite quantité de soluté à l'intérieur de la colonne.

On peut considérer que ce pic observé dans l'expérience de l'impulsion nulle pour le débit Q constitue un fond à retrancher des pics d'élution obtenus lors d'expériences normales avec le même débit Q. Ceci revient à considérer qu'un pic d'élution normal est la somme d'un pic dû à la dispersion hydrodynamique et d'un fond dû à la durée (non nulle) des purges.

2. — *Mesure du volume poral et de la porosité de la colonne.*

Une colonne de volume intérieur V et contenant un milieu de porosité ε a pour volume poral $V_p = V\varepsilon$. On mesure V_p par dilution.

Pour cela on part d'une colonne saturée en solution B, et l'on déplace en totalité cette solution de la colonne par la solution A (avec un débit quelconque). La solution B est totalement déplacée lorsque le concentration de l'effluent est devenue égale à celle de A à la précision des mesures près. Soit V_r le volume d'effluent ainsi recueilli (ou le volume de A écoulé), et soit $\overline{C}$ sa concentration :

$$V_p = V_r \frac{\overline{C} - C_0}{C_e - C_0} \qquad \text{d'où} \qquad \varepsilon = V_p/V.$$

La précision du calcul est d'autant meilleure que V_r est petit, à condition bien sûr que la solution A ait bien été totalement déplacée.

3. — *Mesure du volume du siphon.*

Il faut mesurer, lorsqu'on utilise un siphon, le volume de celui-ci pour chacun des débits utilisés ; on observe en effet que le volume délivré par le siphon n'est pas indépendant du débit, surtout aux débits élevés, du fait qu'il ne se vide pas de façon instantanée.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

Description of a method for determinating the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in a homogeneous saturated porous medium

I. — *Experimental method*

Herein is described in detail a method for determinating the D_H coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in an homogeneous satured porous medium, allowing an overall reproductibility better than 1 p. 100. This first part describes the experimental method (obtention of an elution curve containing the necessary data for the computation of D_H). The mathematical treatment, using two different models, will be developed in parts II and III.

Zusammenfassung

Beschreibung einer methode für die messung des hydrodynamischen längsdispersionskoeffizienten in einer wassergesättigten homogenen porösen umgebung

I. — *Methodologie*

Eine Methode für die Messung des hydrodynamischen Längsdispersionskoeffizienten D_H in einer wassergesättigten homogenen porösen Umgebung ist eingehend beschrieben. Sie ermöglicht eine Wiederholungsfähigkeit besser als 1 p. 100. In diesem ersten Teil werden die zu benutzende Prüfeinrichtung und auch die Arbeitsweise vorgelegt, die es ermöglicht, die für die Berechung von D_H notwendige experimentelle Information unter der optimalen Form zu erreichen. Die Berechnungsweise, die sich auf zwei verschiedenen Modelle beruft, wird in den zweiten Teilen erklärt.

РЕЗЮМЕ

Описание методики определения коэффициента продольной гидродинамической дисперсии в гомогенной пористой среде, насыщенной влагой.

I. — Методологические аспекты.

Ж. ЛЕ РЕНАР.

В данном труде детально описывается методика определения коэффициента продольной гидродинамической дисперсии D_H в гомогенной пористой среде, насыщенной влагой. Воспроизводимость этого метода больше чем 1 р. 100. В первой части работы рассматривается применявшаяся экспериментальная аппаратура и описывается способ действия для получения оптимальной формы экспериментальной информации, необходимой для рассчета D_H. Во второй части будут представлены две разных модели этого рассчета.

Référence bibliographique

LE RENARD J., CALVET R., TOURNIER C., HUBERT A., 1977. Etude du phénomène de dispersion hydrodynamique dans un milieu poreux saturé. Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal. *Ann. agron.*, **28** (1), 47-64.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 661-670.

Détermination par spectroscopie UV de la quantité d'herbicide contenue dans un extrait aqueux de sol. Application à l'étude de l'adsorption

Martine TERCÉ et R. CALVET

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Deux méthodes de dosage par spectroscopie UV d'herbicides contenus dans des extraits aqueux de sol ont été examinées :

1) l'analyse de l'extrait aqueux se fait après extraction de la matière organique par un solvant organique ;
2) l'analyse de l'extrait aqueux a lieu directement, à plusieurs longueurs d'ondes choisies préalablement. La détermination de la qualité de l'extraction est effectuée avec trois herbicides (terbutryne, diuron et napropamide).

La sensibilité de l'analyse par spectroscopie directe est mesurée sur des solutions de diuron ou de terbutryne contenant la même quantité de matière organique.
Ces deux méthodes sont ensuite comparées :

— en mesurant la quantité de terbutryne adsorbée par quatre sols ;
— en déterminant les isothermes d'adsorption de la terbutryne sur un seul sol.
Les résultats montrent que :
— pour des sols à faibles teneurs en matière organique (carbone organique < 10 p. 1000), les deux méthodes sont comparables ;
— pour des sols contenant des quantités de carbone organique > 10 p. 1000, la méthode par extraction donne des résultats moins dispersés.

I. — Introduction

L'étude de l'adsorption sur des sols nécessite la mesure des quantités d'herbicide contenues dans des extraits aqueux. Trois méthodes d'analyse sont fréquemment utilisées pour effectuer cette mesure. Le tableau 1 rappelle les conditions générales de leur emploi.

L'analyse spectroscopique peut être effectuée soit directement sur la solution aqueuse, soit après une extraction du composé à doser par un solvant organique. Son utilisation est soumise à deux contraintes : la molécule herbicide doit posséder des bandes d'absorption (UV ou visible) d'une intensité suffisante et elle ne doit pas avoir subi de transformations chimiques. La spectroscopie d'absorption (UV visible) néces-

TABLEAU 1

Possibilités d'utilisation des différents types de méthode d'analyse pour l'étude de l'adsorption

Méthode	Analyse directe sur la solution aqueuse	Utilisation en présence d'une dégradation
Utilisation de molécules radioactives	oui	non
Techniques chromatographiques	non	oui
Analyse spectroscopique	oui ou non	non

site un matériel assez peu coûteux et très répandu, et de ce fait, est une technique fort utile dans certains cas, comme dans les études d'adsorption par exemple. L'évaluation de la précision que l'on peut en attendre fait l'objet de cette note.

II. — Analyse spectroscopique après extraction de la solution aqueuse

Un solvant fréquemment utilisé est le chloroforme. Différents essais effectués avec trois herbicides (terbutryne, diuron et napropamide *) nous ont permis de définir un procédé à la fois commode et conduisant à des résultats satisfaisants : il consiste à extraire deux fois un volume de n ml de solution aqueuse par n ml de chloroforme.

La solution chloroformique est évaporée et l'herbicide cristallisé est redissous dans le méthanol. L'analyse spectroscopique est effectuée sur la solution méthanolique. Dans ces conditions, la matière organique provenant du sol et présente dans la solution aqueuse ne perturbe pas le spectre d'absorption de l'herbicide. Ceci a été vérifié en appliquant ce traitement à un extrait aqueux de sol seul, et à un autre extrait contenant de la terbutryne. La figure 1 représente les spectres d'absorption des deux solutions méthanoliques correspondantes. L'extraction par le chloroforme permet donc d'éliminer une très grande partie des composés hydrosolubles du sol.

La concentration de la solution méthanolique doit être suffisante pour permettre une analyse spectroscopique. Par exemple, pour un parcours optique de 1 cm, elle ne peut pas être inférieure à :

0,1 μg/ml pour la terbutryne (λ = 225 nm)
0,2 μg/ml pour le diuron (λ = 250 nm)
0,1 μg/ml pour le napropamide (λ = 216 nm).

Il ne faut pas confondre ces concentrations avec les limites de détection qui sont environ quatre fois plus faibles.

Il est donc nécessaire d'extraire par le chloroforme des volumes de solution aqueuse d'autant plus grands que les quantités d'herbicide présentes sont faibles. Il

* La terbutryne a été fournie par la Société Ciba Geigy, le diuron et le napropamide l'ont été par la Société Pepro.

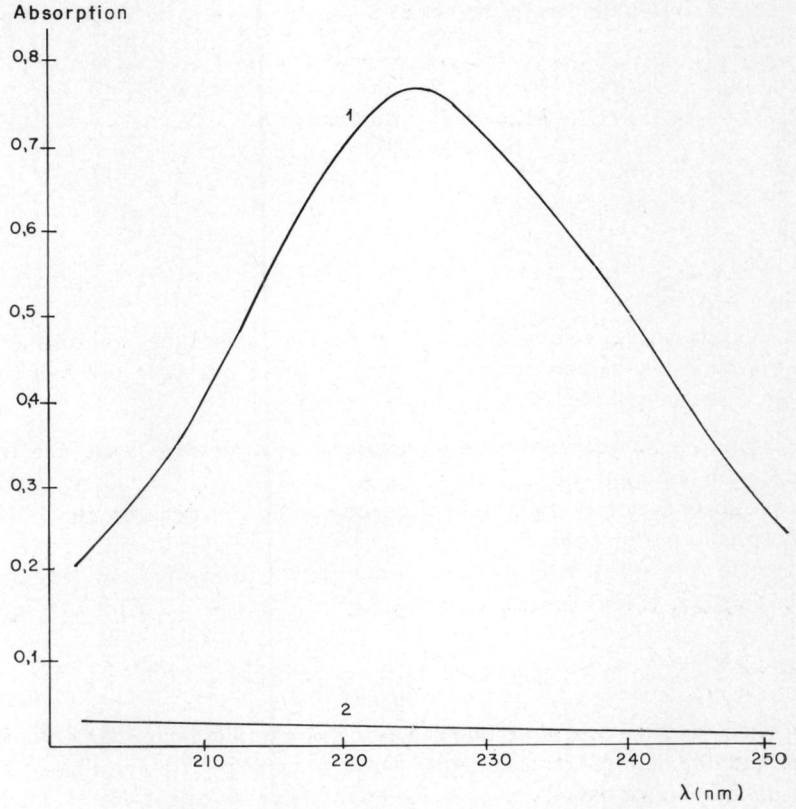


FIG. 1. — *Spectre d'absorption dans le méthanol :*
1) *de la terbutryne extraite,*
2) *de la matière organique extraite.*

existe cependant une limite à cette augmentation en raison des difficultés de manipulation qui en résultent. L'étude de ce problème nous a amenés à la conclusion suivante : pour obtenir des résultats satisfaisants, la concentration de l'extrait aqueux de sol doit être supérieure à 1 μ g/ml. Dans ces conditions, le taux d'extraction de l'herbicide est compris entre 90 et 100 p. 100.

La précision de cette méthode n'est donc pas liée aux caractéristiques de l'analyse spectroscopique. Elle est entièrement déterminée par la qualité de l'extraction. Soulignons que cette restriction est aussi valable pour les méthodes chromatographiques. Cela implique évidemment la nécessité de procéder à des extractions de solutions aqueuses de référence.

III. — Analyse spectroscopique directe

A. — *Principe*

Il s'agit d'une méthode classique d'analyse spectroscopique des mélanges. Son principe est le suivant. Soient deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2, H_1, M_1 et H_2, M_2 les

absorptions correspondant respectivement à l'herbicide et à la matière organique. Nous avons :

$$H_1 + M_1 = A_1 \qquad \text{absorption totale à } \lambda_1$$
$$H_2 + M_2 = A_2 \qquad \text{absorption à } \lambda_2.$$

En posant $\alpha = \frac{M_1}{M_2}$, $\beta = \frac{H_1}{H_2}$ il vient

$$H_2 = \frac{A_1 - \alpha A_2}{\beta - \alpha} \qquad \text{et} \qquad H_1 = \beta H_2.$$

Ces deux dernières relations permettent donc de déterminer l'absorption due à l'herbicide, d'où l'évaluation de sa concentration. Pour que cette détermination soit la meilleure possible, il faut :

— choisir les longueurs d'onde d'analyse λ_1 et λ_2 de telle sorte que le terme $(A_1 - \alpha A_2)$ soit le plus grand possible ;

— que la concentration en matière organique ne soit pas trop élevée (voir les résultats dans le paragraphe suivant) ;

— que la valeur de α soit constante, ce qui est obtenu en effectuant les extractions aqueuses de sol dans les mêmes conditions.

B. — *Etude de la sensibilité de la méthode*

Elle a été effectuée avec la terbutryne et le diuron à l'aide de solutions contenant la même quantité de matière organique et des quantités variables d'herbicide. Les couples de longueur d'onde λ_1 et λ_2 utilisés pour faire le calcul des concentrations ont été choisis en fonction du critère précédemment donné. Ce sont pour la terbutryne : 210-225 ; 210-235 ; 210-240 ; 225-260 ; pour le diuron : 212-250 ; 219-227 ; 219-250 ; 227-250.

Les tableaux 2 et 3 donnent les concentrations en herbicides trouvées dans les solutions ainsi que les densités optiques observées aux maximums d'absorption.

TABLEAU 2

Résultats obtenus avec la terbutryne

N°	Concentration de la solution µg/ml	Dilution effectuée pour la mesure	DO * (matière organique) 225 nm	DO * (herbicide) 225 nm	Concentration trouvée µg/ml
1	4,73	4/10	0,210	0,303	4,75
2	2,36	5/10	0,263	0,189	2,34
3	1,18	6/10	0,315	0,114	1,18
4	0,48	8/10	0,420	0,061	0,48
5	0,24	—	0,525	0,038	0,16

* : les DO correspondent à un parcours optique de 1 cm.

TABLEAU 3

Résultats obtenus avec le diuron

N°	Concentration de la solution µg/ml	Dilution effectuée pour la mesure	DO * (matière organique) 250 nm	DO * (herbicide) 250 nm	Concentration trouvée µg/ml
1	4,93	8/10	0,156	0,330	4,93
2	2,46	—	0,195	0,206	2,48
3	1,23	—	0,195	0,103	1,22
4	0,49	—	0,195	0,041	0,48
5	0,25	—	0,195	0,021	0,18

DO * : les DO correspondent à un parcours optique de 1 cm.

L'analyse est donc possible si à la longueur d'onde du maximum d'absorption de l'herbicide l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\frac{\text{Absorption due à l'herbicide}}{\text{Absorption due à la matière organique}} > 0{,}10.$$

Il faut souligner que ces mesures ne peuvent être effectuées correctement qu'en utilisant une cellule de mesure à circulation (1). En effet, une telle cellule présente les avantages suivants :

— elle occupe toujours rigoureusement la même place dans le faisceau lumineux du spectromètre,

— elle peut être rincée très efficacement,

— elle n'est jamais manipulée.

IV. — Application

Ces deux méthodes ont été comparées :

— d'une part en mesurant la quantité de terbutryne adsorbée par quatre sols (2),

— d'autre part en déterminant l'isotherme d'adsorption de ce même herbicide par un sol.

A. — *Adsorption de la terbutryne sur quatre sols*

Les compositions des quatre sols utilisés sont données dans le tableau 4.

Les quantités de terbutryne adsorbées sont déterminées de la façon suivante : 50 g de sol sont mis en contact avec 100 ml d'une solution de terbutryne à environ 15 µg/ml et contenant du $CaCl_2$(M/100). Après 24 h d'agitation à 20 °C, les suspen-

(1) Montage expérimental utilisé par le Laboratoire d'Analyses de Sols d'Arras, INRA, 273, rue de Cambrai, 62000 Arras.

(2) Les échantillons de ces sols ont été prélevés par le Service de la Carte Pédologique de l'INRA.

TABLEAU 4

Composition des sols utilisés

	Argile p. 1000	Carbone organique p. 1000	CE meq/100 g
Autichamps	210	11,7	13
Lande de Péreuse	168	11,6	10,4
Château-Thierry	166	8,9	9,8
Epiniac.....	138	14,9	10

sions sont centrifugées. Les solutions surnageantes sont ensuite analysées par les deux méthodes précédemment décrites. Des solutions témoins sont également analysées. Elles sont constituées par des extraits aqueux de sols obtenus dans les mêmes conditions et additionnées de quantités connues d'herbicide. Pour chaque sol les mesures sont effectuées avec dix répétitions.

Par ailleurs, pour la méthode par analyse spectroscopique directe, il est important de vérifier la constance du paramètre α, représentant le rapport entre les absorptions de la matière organique à deux longueurs d'onde différentes. Pour cela, dix extractions aqueuses ont été effectuées sur les quatre sols et leur absorption mesurée à plusieurs longueurs d'onde comprises entre 210 et 250 nm. Une étude statistique des résultats montre que :

$$0{,}98\ \alpha < \alpha < 1{,}02\ \alpha \qquad \text{pour 95 p. 100 de probabilité.}$$

Dans les conditions expérimentales utilisées, il est donc possible de considérer le paramètre α comme une constante.

Les quantités de terbutryne adsorbées déterminées par les deux méthodes sont données dans les tableaux 5 et 6. L'analyse des solutions témoins montre que les quantités obtenues sont inférieures aux quantités apportées. Ceci peut être dû, soit à des pertes au cours de la manipulation, soit à des combinaisons entre les matières organiques hydrosolubles et la terbutryne permettant à celle-ci de rester dans la

TABLEAU 5

Résultats obtenus pour la terbutryne par analyse après extraction

Sol	Concentration à l'équilibre µg/ml	Quantité adsorbée µg/g	Quantité déterminée pour les témoins p. 100 des quantités apportées
Autichamps	4,9 ± 0,1	18,4 ± 0,2	90
Lande de Péreuse	4,2 ± 0,2	21,7 ± 0,4	92
Château-Thierry	5,9 ± 0,1	19,1 ± 0,2	90
Epiniac	1,4 ± 0,1	27,8 ± 0,2	93

Les erreurs correspondent à 95 p. 100 de probabilité.

TABLEAU 6

Résultats obtenus pour la terbutryne par analyse spectroscopique directe

Sol	Concentration à l'équilibre µg/ml	Quantité adsorbée µg/g	Quantité déterminée pour les témoins p. 100 des quantités apportées
Autichamps	4,8 ± 0,3	18,7 ± 0,5	100
Lande de Péreuse	4,2 ± 0,6	21,7 ± 1	96
Château-Thierry	5,7 ± 0,2	19,4 ± 0,4	100
Epiniac	2,0 ± 0,6	26,6 ± 1,2	84

Les erreurs correspondent à 95 p. 100 de probabilité.

phase aqueuse. Dans le cas de l'analyse spectroscopique directe, cette différence est surtout marquée avec le sol d'Epiniac en raison des mauvaises conditions d'analyse spectroscopique dues à une trop grande quantité de matière organique en solution. Ces observations ont deux conséquences :

1) il est absolument nécessaire d'effectuer des analyses avec des solutions témoins pour chaque sol étudié ;

2) le calcul des concentrations doit tenir compte de cette analyse.

Les couples de longueurs d'onde utilisés sont les mêmes que précédemment.

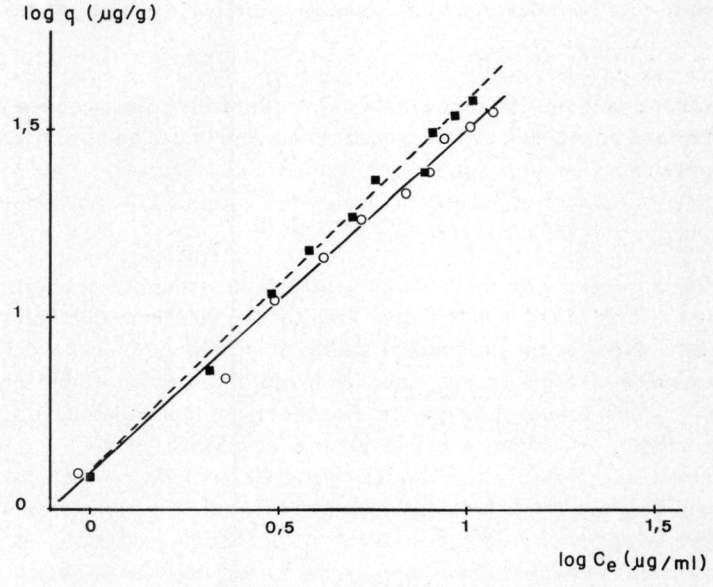


FIG. 2. — *Isothermes d'adsorption.*

Analyse directe : o ; Spectroscopie directe : ■.

B. — *Isotherme d'adsorption de la terbutryne sur le sol de Château-Thierry*

Les mesures sont effectuées comme précédemment avec dix valeurs de la concentration en terbutryne (deux échantillons par concentration). La figure 2 représente les isothermes sous la forme :

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_e + \log K$$

où q = quantité adsorbée en μg/g, C_e = concentration de la solution à l'équilibre en μg/ml, n et K = constantes.

Les résultats sont donnés dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Caractéristiques de l'isotherme d'adsorption de la terbutryne par le sol de Château-Thierry

	Extraction	Spectroscopie directe
$\frac{1}{n}$	0,99 $\pm$ 0,07	0,91 $\pm$ 0,08
log K	0,58 $\pm$ 0,05	0,59 $\pm$ 0,06
r^2	0,992	0,988

Les erreurs correspondent à 95 p. 100 de probabilité.

Les erreurs correspondent à un intervalle de confiance de 95 p. 100. La comparaison des deux coefficients de régression linéaire $\left(\frac{1}{n}\right)$ montre qu'ils ne sont pas significativement différents (95 p. 100 de probabilité). Comme les valeurs de log K sont très voisines, il est donc possible de conclure que les deux méthodes ne conduisent pas à des résultats différents.

V. — Conclusion

D'une façon générale, la méthode par extraction donne des résultats moins dispersés. Quand cela est possible, il faut donc l'utiliser de préférence à l'analyse spectroscopique directe. Nécessitant des manipulations moins longues, cette dernière peut présenter un intérêt notable surtout pour les étude d'adsorption faites avec des sols donnant des extraits aqueux pauvres en matière organique. Bien qu'un peu moins précise, elle conduit néanmoins à des résultats satisfaisants.

La spectroscopie d'absorption UV peut donc être utilisée pour étudier l'adsorption de produits herbicides par des sols. Rappelons toutefois qu'une condition impérative doit être remplie : il ne doit pas y avoir de dégradation. C'est le cas pour beaucoup de molécules herbicide quand le temps de contact solution-sol est de l'ordre de quelques jours au plus.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

Determination of the amount of herbicide contained in a soil aqueous extract by UV spectroscopy

Two methods for determining the amount of herbicides contained in soil aqueous extracts by UV spectroscopy have been studied :

1) the analysis of the aqueous extract occurs after the extraction of the organic matter with an organic solvent ;
2) the analysis of the aqueous extract is carried out directly at several wavelength previously chosen. The estimation of the extraction quality is carried out with three herbicides (terbutryne, diuron and napropamide).

The sensibility of the analysis by direct spectroscopy is measured on diuron or terbutryne solutions containing the same amount of organic matter.
These two methods are then compared :

— by measuring the amount of terbutryne adsorbed by four soils ;
— by determining the adsorption isotherms of the terbutryne in one soil only.

The results show that :

— for soils with low contents in organic matter (organic carbon < 10 p. 1000) the two methods are comparable ;
— for soils containing more than 10 p. 1000 of organic carbon, the extraction method gives less scattered results.

Zusammenfassung

Bestimmung durch ultraviolett-spektroskopie der in einem wässerigen bodenextrakt enthaltenen herbizidmenge. Anwendung für die untersuchung der adsorption

Zwei Methoden für die Bestimmung der in wässerigen Bodenextrakten enthaltenen Herbiziden durch Ultraviolett-Spektroskopie wurden untersucht :

1) die Analyse des wässerigen Extrakts findet nach der Extraktion der organischen Substanz mit einem organischen Lösungsnittel statt ;
2) die Analyse des wässerigen Extrakts geschiebtunmittelbar zu mehreren voraus gewählten Wellenlängen. Die Bestimmung des Extraktionswerts wurde mit drei Herbiziden (Terbutryne, Diuron und Napropamide) durchgeführt.

Die Empfindlichkeit der Analyse durch direkte Spektroskopie ist mit Diuron-oder Terbutrynelösungen mit demselbem Gehalt an organischer Substanz gemessen.
Die zwei Methoden sind dann verglichen :

— beim Messen der durch vier Böden adsorbierten Terbutrynemenge ;
— beim Bestimmen der Adsorptions-isothermen von Terbutryne auf einem einzigen Boden.

Die Ergebnisse zeigen dass :

— für Böden mit niedrigen Gehalten an organischer Substanz (organischer Kohlenstoff < 10 p. 1000) sind die zwei Methoden vergleichbar ;
— für Böden mit Gehalten an organischem Kohlenstoffhöher als 10 p. 1000 gibt die Extraktionsmethode weniger auseinandergehende Ergebnisse.

РЕЗЮМЕ

Определение, с помощью ультра-фиолетовой спектроскопии, количеств гербицидов в водных вытяжках почвы. Применение при изучении адсорбции.

М. ТЕРСЕ, Р. КАЛЬВЕ.

При помощи ультра-фиолетовой спектроскопии изучались два метода дозировки содержания гербицидов в водных вытяжках почвы.

1) Анализ водных вытяжек после экстракции органического вещества органическим растворителем ;

2) Непосредственный анализ водных вытяжек, на предварительно выбранных волнах различной длинны. Определение качества экстракции проводилось на трех гербицидах : тербутрин, диурон и напропамид ;

Чувствительность непосредственного спектроскопического анализа определялась на растворах диурона и тербутрина, содержавших одинаковые количества органического вещества.

Эффективность обоих методов сравнивалась, затем, при помощи :

— измерения количеств тербутрина адсорбированных четырьмя различными почвами ;
— определения изотерм адсорбции тербутрина только одной почвой ;

Полученные результаты показывают что :

— оба метода дают сравнительно равные результаты в почвах бедных органическим веществом (< 10 р. 1000 органического углерода) ;
— метод с экстракцией органического вещества дает менее рассеянные результаты в почвах содержащих > 10 р. 1000 органического углерода.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 671-677.

Note technique

Dispositif de mesure simultanée de la pluviométrie et de débits de réseaux expérimentaux de drainage

C. PERREY et A. VERGUET *

Station de Science du Sol,
** Laboratoire de Microbiologie des Sols,*
Centre de Recherches Agronomiques de Dijon, I. N. R. A.,
21000 *Dijon*

Résumé

Un dispositif de mesure simultanée de la pluviométrie et du débit d'un réseau de drainage est décrit: il comprend un ou plusieurs bacs à augets basculeurs reliés à un enregistreur d'événements multivoies. Ce travail décrit en détail les parties mécaniques et électroniques du dispositif et analyse succinctement ses performances.

I. — Introduction

L'étude du fonctionnement hydraulique d'un réseau de drainage nécessite un système d'enregistrement simultané des débits de l'eau évacuée par le collecteur et de la pluviométrie. Chacun des dispositifs de mesure de débit imaginés en France ou à l'étranger possédant des caractéristiques particulières, s'adapte à une situation ou à des besoins précis.

Parmi les dispositifs utilisés nous citerons :

— bac à déversoir étalonné (Guyon, 1972),
— bac à siphon et bac à bascule (Panier et Alexandrello, 1972),
— bac à vidange automatique, variante du système précédent utilisé à la Station de Science du Sol, I. N. R. A., de Dijon,
— augets basculeurs à totalisateur (Damour *et al.*, 1972),
— jaugeur totalisateur à bascule ([a]),
— débimère « Flowmeter » ([b]).

([a]) Heinrich Hofman Metal Industriewerk 2300 Kiel, Selkoppel Weg.
([b]) Field Drainage experimental unit. Trumpington Cambridge, CB 2LF.

L'expérimentateur se heurte à de nombreux problèmes lors de l'installation d'un dispositif de contrôle de drainage en relation avec les conditions particulières :

— de topographie : revanche nécessaire à l'installation d'un appareil de jaugeage sous la génératrice inférieure du collecteur ;

— de parcellaire : relation surface de la parcelle élémentaire-débit de pointe à prévoir-taille du jaugeur-revanche disponible ;

— de mesure : maintien d'une bonne précision sur toute la gamme des débits ;

— d'enregistrement des mesures : source d'énergie disponible pour la mise en fonctionnement des appareils ; rusticité, fiabilité et coût d'appareils mono ou multivoies assurant l'enregistrement ;

— d'exploitation des enregistrements : simplification de la transformation des signaux enregistrés en données chiffrées utilisables ;

— de prélèvement d'échantillons : possibilité de prélever en parties aliquotes pour analyses des effluents pour établissement de bilans.

2. — Description du dispositif

2.1. — *Partie mécanique*

Débitmètre :

Le dispositif que nous proposons ici est un appareil inspiré, pour la partie mécanique, des augets basculeurs déjà cités (Damour *et al.*, 1977) auxquels a été adjoint un dispositif électronique enregistreur d'événements.

La figure 1 donne le croquis côté du bac qui comporte deux augets d'une contenance approximative de 15 l se présentant alternativement sous le collecteur par basculement. Une cadence maximale d'un basculement toutes les 3 s. doit être admise. Cette cadence correspond à un débit d'environ 5 l/s, et limite, pour cet appareil, la surface de la parcelle collectée à 0,6-0,7 ha. En effet, les débits de pointe signalés dans la littérature sont de 7 à 7,5 l/s/ha (F. D. E. U. annual reports).

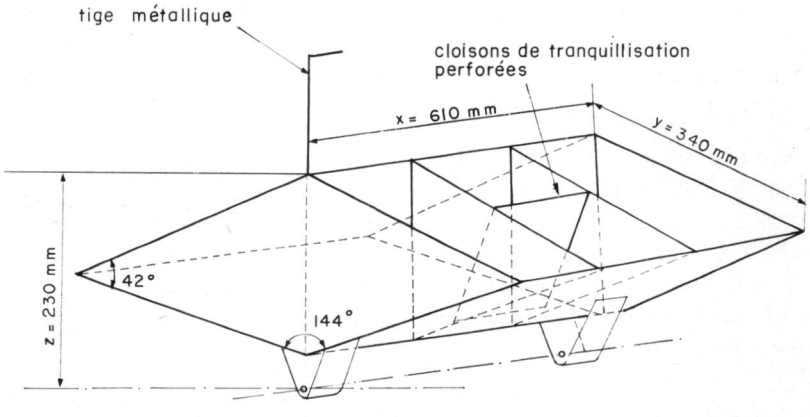


FIG. 1. — *Bac à augets basculants pour jaugeage de réseaux expérimentaux de drainage.*

Il est possible de faire varier la contenance des augets en fonction de la surface à contrôler, en modifiant les cotes x, y ou (et) z indiquées dans la figure 1. Seule x peut être modifiée de façon importante ; y et z agissent en effet simultanément sur l'amplitude du mouvement alternatif sous le collecteur et sur le couple de basculement. (Les chocs sont souvent responsables de dégâts aux soudures et scellements du dispositif). Les cotes d'angles sont absolument inamovibles.

Un réglage fin du remplissage de chaque auget peut s'effectuer en limitant la course des augets par butées équipées de silent-blocs fixées au support à l'aide de tiges filetées (fig. 2).

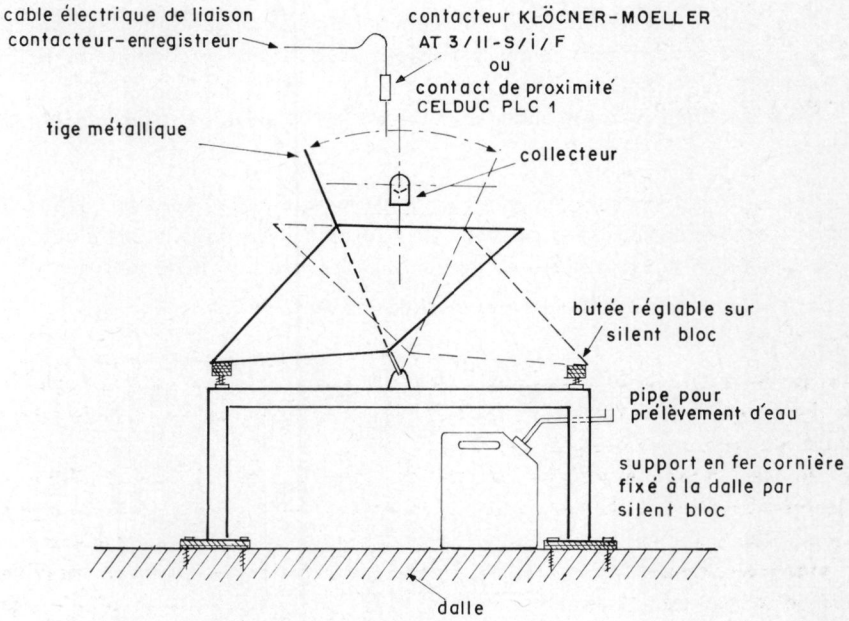


FIG. 2. — *Schéma d'installation d'un bac de jaugeage.*

Le bac soumis à des chocs violents et fréquents doit être réalisé en tôle forte (15 à 20/10), et soudé soigneusement.

Le pluviomètre :

Le pluviomètre à augets basculeurs est du type classique du commerce adaptable sur enregistreur d'événements.

2.2. — *Partie électronique*

2.21. *Mesure de débit.*

Le dispositif électronique qui permet l'enregistrement des débits en fonction du temps est schématisé dans la figure 3.

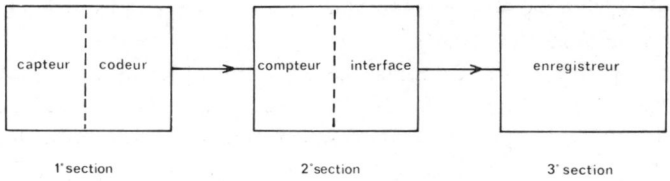


FIG. 3. — *Principe du dispositif d'enregistrement des débits.*

Il comprend trois sections :

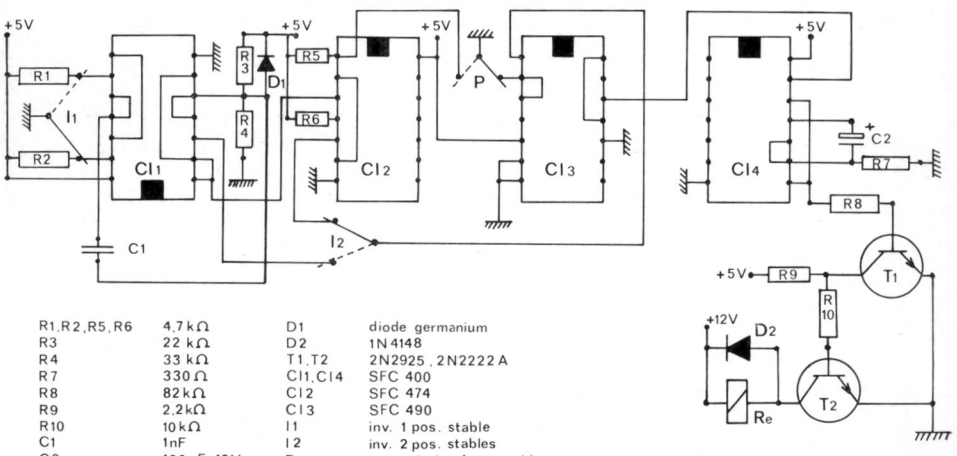
— une section de détection du basculement du bac produisant des impulsions,

— une section de comptage des impulsions produites et de commande de l'enregistrement.

— une section d'enregistrement qui inscrit les impulsions issues du comptage précédent.

Le dispositif est conçu pour pouvoir mesurer simultanément les débits d'eau issue d'un nombre de parcelles pouvant aller jusqu'à onze dans le cas d'une section d'enregistrement à douze voies, une voie étant réservée au pluviomètre.

L'ensemble du schéma électronique est donné dans la figure 4.



R1,R2,R5,R6	4,7 kΩ	D1	diode germanium
R3	22 kΩ	D2	1N4148
R4	33 kΩ	T1,T2	2N2925 , 2N2222A
R7	330 Ω	CI1,CI4	SFC 400
R8	82 kΩ	CI2	SFC 474
R9	2,2 kΩ	CI3	SFC 490
R10	10 kΩ	I1	inv. 1 pos. stable
C1	1nF	I2	inv. 2 pos. stables
C2	100 µF-10V	P	poussoir inv. 1 pos. stable
		Re	relais 12V-500Ω

FIG. 4. — *Schéma du dispositif de mesure de débit.*

Sections de détection et comptage.

La description qui suit concerne l'équipement de détection et comptage nécessaire à un bac basculeur. L'équipement d'un bac basculeur est indépendant de celui des autres bacs. Chaque bac supplémentaire devra recevoir un équipement identique.

Détection : Le *capteur* I_1 est un inverseur simple. Il est suivi d'un *codeur* CI_1 (SFC 400) (quadruple NAND à deux entrées) qui élimine les rebonds dus aux contacts mécani-

ques et fournit deux impulsions l'une positive, l'autre négative (sens logique) à chaque basculement de l'auget.

— *Comptage* : le *compteur* reçoit les impulsions issues du codeur et attaque l'interface tous les dix ou tous les vingt basculements du bac. Il se compose d'une double bascule CI_2 type D, câblée en diviseur par 2 (SFC 474), et d'un compteur décimal CI_3 (SFC 490). En comptant par dix le compteur CI^3 est attaqué directement par les impulsions négatives issues du codeur CI_3, en comptant par vingt, il est attaqué par la sortie de la bascule D CI_2, elle-même commandée par les impulsions positives produites par le codeur CI_1. Le poussoir P remet à zéro le compteur CI_3 et la bascule CI_2. La sélection 10/20 est faite par I_2.

— *L'interface* comprend CI_4 (quatre NAND, deux entrées), câblé en monostable (SFC 400) suivi de deux transistors (T_1, T_2) commandant un relais Re.

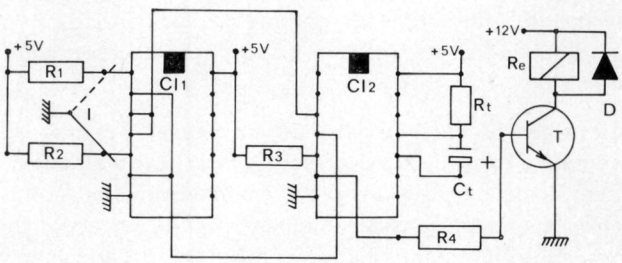
Le relais sera actionné un bref instant au dixième ou au vingtième basculement de l'auget. Compte tenu de l'utilisation de la moitié des possibilités des éléments CI_2 et CI_4, il est toujours possible de les utiliser en commun pour suivre deux collecteurs.

— *Enregistrement* : un *enregistreur* multivoies type stylgraphe * fonctionnant sous 12 V continu est utilisé. Chaque voie est munie d'un marqueur actionné par un petit électroaimant alimenté par l'intermédiaire des contacts du relais de l'interface.

L'enregistrement se fait sous forme de traits. L'action brève du relais de l'interface permet de limiter la consommation des électroaimants des marqueurs au minimum et de séparer nettement les traits au cours de forts débits du collecteur à surveiller ; ceci avec une vitesse de défilement du diagramme, très lente (30 mm/h).

2.22. *Pluviométrie.*

Chaque basculement d'un auget du pluviomètre doit être compté. Le schéma du dispositif de comptage est présenté dans la figure 5. Ce dispositif comprend un



R1.R2.R3	4.7kΩ
R4	6.8kΩ
Rt	27kΩ I t = 1s
Ct	50µF I
CI1	SFC 400
CI2	SFC 4121
T	2N 2222 A
D	1N 4148
Re	relais 12V_ 500Ω
I	inverseur

FIG. 5. — *Schéma du dispositif de comptage du pluviomètre.*

* Etablissements Guerpillon, 64, avenue Aristide-Briand, 92120 Montrouge.

capteur comprenant un inverseur I et un circuit intégré CI_1 (SFC 400) attaquant une interface constituée d'un monostable CI_2 (SFC 4121) suivi d'un transistor T et du relais Re. Le relais commande une voie de l'enregistreur pendant environ une seconde à chaque basculement d'un auget. L'utilisation de l'élément CI_1 prévient tout défaut d'enregistrement en cas de contacts interrompus et rétablis par vibrations.

3. — Utilisation pratique du dispositif

Chaque bac de mesure doit être étalonné au laboratoire ; en effet, le niveau de remplissage des augets varie avec le débit d'entrée d'eau. Il a été trouvé une régression linéaire entre le volume d'eau par auget au basculement et le débit écoulé. A titre indicatif pour un bac actuellement en fonctionnement, nous avons obtenu l'équation de régression :

$$\text{Volume du bac (l)} = 12{,}055 + 0{,}658 \text{ débit d'entrée (l/s)}$$

avec un coefficient de régression $r = 0{,}976$.

Cet étalonnage permet par ailleurs de relier le débit d'entrée et la cadence de basculement. A partir de ces données, il est possible de dresser un abaque reliant la distance entre traits d'enregistrement et débits instantanés.

Les avantages de ce dispositif tiennent essentiellement aux caractéristiques suivantes :

— Synchronisation parfaite entre les enregistrements sur un même graphique : de la pluie et de l'écoulement de chaque parcelle du dispositif (1 voie par parcelle).

— Coût d'enregistrement relativement modeste dans le cas d'essais complexes (enregistreur multivoies pouvant être commandé à distance).

— Fonctionnement autonome possible grâce à une alimentation 12 V sur batteries.

— Jaugeage possible sur une large gamme de débits.

— Possibilité d'adjoindre aisément un dispositif de prélèvements d'échantillons en parties aliquotes.

Outre les difficultés habituelles liées au traitement des mesures, ce système présente l'inconvénient d'exiger une revanche non négligeable pour la mise en place des bacs basculeurs et du dispositif de prélèvement d'eau (au moins 80 cm). Cette revanche peut être cependant considérablement réduite en encastrant le récipient destiné à contenir les prélèvements d'eau de drainage à l'intérieur de la dalle de l'abri.

Reçu pour publication en décembre 1977.

Summary

Device for the simultaneous measurement of the pluviometry and flow rates of experimental drainage systems

A device for the simultaneous measurement of the pluviometry and flow rate of a drainage system is described : it includes one or several containers with swinging buckets connected to a multi-channel event recorder. This paper gives a detailed description of the mechanical and electronical elements of the device and a brief analysis of its performances.

Ann. agron., 1977, **28** (6), 679-682.

Chronique des livres

HÉNIN S. — *Cours de physique du sol*, ORSTOM, EDITEST, Tome I, 1976 (159 p.) ; Tome II, 1977 (221 p.).

C'est le premier ouvrage traitant de l'ensemble de la physique du sol édité en langue Française. On peut donc regretter qu'il s'agisse d'un cours et non d'un traité. Mais l'auteur précise que ces livres s'adressent à des étudiants en sciences naturelles, agronomes, écologistes, pédologues, et qu'un effort a été fait pour rendre accessibles à ces lecteurs, un certain nombre de démonstrations. Cette orientation a eu pour conséquence un choix des textes de référence, un équilibre entre les sujets traités, qui sont apparus comme difficilement compatibles avec une présentation exhaustive de l'état actuel de la physique du sol.

Cet inconvénient est compensé par le fait que l'orientation pédagogique de l'ouvrage a conduit l'auteur à mettre en évidence le caractère cohérent de cette discipline qui constitue un chapitre original de l'étude des milieux dispersés.

Le plan de l'ouvrage découle tout naturellement de cette attitude.

Tome I : Texture-Structure-Aération.

Tome II : L'eau et le sol (rétention, circulation et bilan dans le milieu naturel). Les propriétés mécaniques. La chaleur et le sol.

Ce sont évidemment les paramètres caractérisant la texture et la structure qui constituent les données communes à des phénomènes en apparence disparates. Ajoutons que 93 figures permettent d'illustrer les concepts et les problèmes évoqués dans le texte, ce qui complète l'effort de présentation concernant l'établissement des formules et les applications numériques qui doivent faciliter la compréhension des problèmes concernant cette discipline.

CAMPBELL G. S. — *An introduction to environmental biophysics*. Heidelberg Science Library, Springer Verlag, New York, 1977, 159 p.

Si l'on veut présenter en une phrase l'esprit de cet ouvrage, il faut lui donner comme titre : « Introduction à la bioclimatologie ».

Dans un premier temps les facteurs physiques de l'environnement sont étudiés :

— température : profils dans l'air, lois de pénétration dans le sol ;
— humidité : tension de vapeur, potentiel hydrique ;
— vent : profils au dessus et dans les cultures ;
— rayonnements : solaires, thermiques, rayonnement net ;
— transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement : convections libre et forcée.

Puis ces différentes notions sont appliquées à l'analyse des relations entre les animaux et leur environnement, l'homme et son environnement, les plantes et leur environnement.

Un dernier chapitre traite des échanges dans les couverts végétaux : rayonnements, évapotranspiration.

Les deux chapitres sur les interactions environnement-animal et environnement-homme donnent une bonne analyse du bilan d'énergie et s'efforcent de dégager les potentiels physiques (températures équivalentes) qui codétiennent les échanges thermiques au niveau de l'organisme et de l'ambiance.

Dans l'analyse de la production de chaleur, le métabolisme basal, les dépenses musculaires et le niveau alimentaire sont bien séparés (cf. introduction). L'accent est mis sur l'importance de la température de surface dont le niveau dépend de l'intensité des échanges. De nombreux tableaux et graphes de valeurs caractéristiques de différents paramètres sont fournis.

On note cependant des erreurs de détails (p. 80, fig. 7.1, le premier graphe est probablement erroné).

En résumé, ces deux chapitres sont un guide méthodique intéressant pour la modélisation physique des échanges des animaux en plein air, lorsqu'on ne s'attache pas à l'explication physiologique de ceux-ci. On doit souligner l'aspect très pratique de l'exposé.

Les chapitres relatifs aux échanges entre les plantes et le milieu présentent de façon très claire les phénomènes de photosynthèse et transpiration de la feuille ainsi que le bilan d'énergie résultant qui conditionne la température de surface de celle-ci. L'étude de la pénétration des rayonnements dans le couvert végétal permet de passer à la photosynthèse, au bilan d'énergie et à l'évapotranspiration de l'ensemble de la culture.

Bien que l'éventail de sujets abordés soit très important, il faut signaler la concision des différents chapitres qui sont complétés par une petite bibliographie et des exercices (non corrigés !). Une attention particulière est portée à l'homogénéité des notations et des unités employées (avec des tables d'ordres de grandeur et de conversion en annexe).

Tout cela fait de ce petit ouvrage un excellent cours, présentant de façon très actuelle les notions nécessaires pour commencer des études de bioclimatologie végétale ou animale.

R. B., P. B.

BRADY N. C. — *Advances in Agronomy*, Volume 28, Academic Press New York, 432 p., 1976.

Les seuls liens existant entre les différents chapitres de cet ouvrage sont l'actualité des sujets présentés et la volonté de présenter des articles de synthèse faits par des spécialistes.

Trois chapitres sont consacrés aux problèmes de la nutrition azotée :

— stress azotés des plantes (E. A. N. Greenwood) ;

— accumulation des nitrates dans les légumes (D. N. Maynard, A. V. Barker, P. L. Minotti, N. H. Peck) ;

— emploi des traceurs pour les recherches relatives à l'azote dans le sol et à la fertilisation azotée (R. D. Hauck, J. M. Bremner).

Des revues bibliographiques sont ensuite présentées dans les domaines de l'amélioration génétique et de la physiologie des céréales :

— relations nucléocytoplasmiques chez le blé (G. C. M. Sage) ;

— aspects de la physiologie comparée de la production de grain des céréales (L. T. Evans, I. F. Wardlaw) ;

— production de biomasse et « harvest index » des céréales : critères agronomiques et de sélection (C. M. Donald, J. Hamblin) ; l'« harvest index » est le rapport entre la production de grain et la production totale de toute la plante (biomasse).

Les trois derniers chapitres se rapportent à des domaines très différents :

— méthodes statistiques dans les recherches de classification des sols (R. J. Arkley) ;
— progrès, problèmes et perspectives des recherches sur le protoplasme des plantes (I. K. Vasil) ;
— déficits hydriques des cultures (J. E. Begg, V. C. Turner).

Ces articles, suivis d'une abondante bibliographie, font le point de l'avancement des recherches dans ces différents domaines.

R. B.

BUVET R., ALLEN M. J., MASSUE J. P. — *Living systems as energy converters*. North-Holland Publishing C°, Amsterdam, 347 p., 1977.

Une conférence sur les systèmes vivants en tant que convertisseurs d'énergie s'est tenue à Pont-à-Mousson (France) en octobre 1976, organisée par le Conseil de l'Europe en collaboration avec la Commission des Communautés Européennes. Elle a donné lieu à des comptes rendus, en anglais, regroupés dans un ouvrage de 347 pages.

Une première partie (7 articles) est consacrée à l'énergie dans les molécules biologiques. Plus précisément, un état de recherches est présenté concernant l'évolution, les structures et les fonctions des catalyseurs biologiques les plus importants impliqués dans les conversions énergétiques au sein des cellules vivantes.

La seconde partie (9 articles) traite du rôle des membranes biologiq es dans les processus énergétiques cellulaires et en particulier des mécanismes fondamentaux de la photosynthèse.

La dernière partie est beaucoup plus disparate, intitulée « Energie dans les tissus, les organismes et les populations » ; elle regroupe 9 articles qui vont depuis la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique par des solutions de chloroplastes jusqu'aux bilans énergétiques dans l'agriculture Américaine.

Le comité d'organisation de la conférence ayant fait appel aux conférenciers parmi les plus connus dans chaque domaine retenu, la qualité de chacun des textes pris isolément est excellente. Par contre, l'ensemble choisi est incomplet à certains égards. Les bases physiologiques de la productivité des

plantes supérieures (cycles C_3, C_4, photorespiration, etc...), la production d'algues en milieu marin, les processus thermochimiques de traitement de la biomasse, par exemple, n'ont pas été évoqués.

Cet ouvrage s'inscrit dans la série des documents publiés récemment sur la contribution possible de la biologie à la couverture de nouveaux besoins (énergie, matière première). Il se caractérise dans cet ensemble par la qualité exceptionnelle sur le plan scientifique des articles retenus. Il ne permet pas, par contre, de se faire une idée globale suffisamment complète des efforts qui se développent actuellement sur le thème de la conversion biologique de l'énergie solaire. La qualité des articles impose néanmoins la présence de cet ouvrage dans toute bibliothèque soucieuse de réserver une place à ce thème.

Ph. C.

Proceedings of the 1st International Symposium on Nitrogen Fixation. Volumes 1 *et* 2. *Edités par* William E. NEWTON and C. J. NYMAN. Washington State University Press, 1976, 717 p.

Ces deux volumes contiennent les articles présentés lors d'un Symposium *interdisciplinaire* sur la fixation de l'azote qui s'est déroulé à Pullman (U. S. A.) en juin 1974.

Le volume 1 est divisé en deux parties : *chimie* et *enzymologie*.

L'azote moléculaire N_2 est un composé extrêmement peu actif. Sa liaison à des complexes contenant des métaux de transition lui confère une certaine réactivité. Les cinq premiers chapitres discutent de différentes approches visant à comprendre et améliorer la liaison de N_2 à de tels complexes contenant notamment du molybdène et leur réduction. Trois articles proposent ensuite des modèles concernant les mécanismes d'action de la nitrogénase.

Les deux derniers tiers du volume sont consacrés à l'enzymologie des nitrogénases préparées à partir de bactéries fixatrices libres ou symbiotiques et d'algues bleues. L'étude du rôle de la leghémoglobine dans la fixation symbiotique de N_2 et de l'existence d'une sous-unité commune, contenant du molybdène, entre nitrogénase et nitrate-réductase constitue les deux derniers chapitres. Ce volume est donc un ouvrage de référence pour les biochimistes et chimistes intéressés par la fixation de N_2 mais également pour tous ceux concernés par les enzymes métalliques, les processus de réduction enzymatique et les protéines sensibles à l'oxygène.

Le volume 2 est divisé en trois parties : *génétique, aspects agronomiques et écologiques*, et *intérêt des recherches actuelles du point de vue économique*.

Dans la section génétique, trois chapitres sont consacrés à l'étude des gènes *nif* (contrôlant la fixation de N_2) et de leur régulation chez des bactéries fixatrices libres : *Klebsiella pneumoniae* et *Azotobacter vinelandii* ; le rôle de la glutamine synthétase (enzyme jouant un rôle clef dans l'assimilation de NH_4^+) dans la régulation de la fixation est mise en évidence.

En ce qui concerne la symbiose *Rhizobium*-Légumineuse, un chapitre est consacré à l'étude génétique des plantes-hôtes : mise en évidence de gènes contrôlant la reconnaissance spécifique, la formation des nodules, et l'efficience fixatrice. Cinq chapitres sont consacrés à la génétique de *Rhizobium* : systèmes de transfert génétique, discussion du rôle éventuel de plasmides et rôle de la nitrate réductase.

Dans la section agronomique, sept chapitres sont consacrés aux symbioses obligatoires dont cinq à la symbiose *Rhizobium*-Légumineuses : les facteurs limitants de la fixation, le rôle de l'inoculation, le rôle de la photosynthèse, le transfert de l'azote fixé à la plante et l'obtention d'une symbiose à partir d'une culture de tissus.

Les chapitres suivants décrivent différentes associations entre des micro-organismes fixateurs de N_2 et des plantes autres que des Légumineuses : par exemple, *Rhizobium* avec *Trema*, des actinomycètes avec différents groupes d'arbres dont les aulnes par exemple, des algues bleues avec des fouragères aquatiques du genre *Azolla*, des bactéries de la rhizosphère avec des graminés, par exemple, *Spirillum* avec des graminées fourragères ou *Beijerinckia* avec le riz. La communication sur l'association *Spirillum-Digitaria* avait eu un gros impact pendant le Symposium et a été à l'origine de nombreux travaux sur ce type d'association.

La dernière section regroupe cinq articles essayant d'analyser l'intérêt économique des recherches sur la fixation de l'azote : les besoins en azote, la production des engrais azotés, les problèmes d'énergie liés à l'agriculture, les impacts potentiels des recherches actuelles.

Ce second volume devrait être utile aux agronomes intéressés par le problème de l'azote, ou plus généralement, à tous ceux qui souhaitent en savoir plus sur les recherches actuelles dans le domaine de la fixation biologique de l'azote.

STEWARD W. D. P. — *Nitrogen fixation by free-living micro-organisms*, 1975, 471 p., PBI n° 6.

NUTMAN P. S. — *Symbiotic nitrogen fixation in plants*, 1976, 584 p., PBI n° 7, Cambridge University Press.

Ces deux volumes, publiés dans la série des ouvrages de synthèse du Programme Biologique International (PBI), constituent les comptes rendus d'un Symposium sur la Fixation biologique de

l'Azote qui a eu lieu en septembre 1973 à Edimbourg. Malgré les longs délais de publication, ces deux livres constituent encore une base de référence intéressante parce qu'ils contiennent de nombreuses données agronomiques et écologiques provenant de différentes régions du globe.

Le volume 6 est divisé en quatre parties.

La première partie est constituée par des articles sur la fixation non symbiotique par les *bactéries* : physiologie et écologie dans les sols (chapitres 1, 2 et 5), fixation dans la rhizosphère des graminées tropicales (3) et du riz (4), fixation au niveau des feuilles (6), en association avec des plantes aquatiques (8) et avec d'autres micro-organismes (7).

La seconde partie traite de la fixation non symbiotique par des *algues bleues* : les aspects physiologiques (9, 10), les conditions écologiques et géographiques (11, 12, 13, 15, 16), et une fixation d'importance agronomique : le cas des rizières (14).

La troisième partie est consacrée à la technique de mesure de l'activité nitrogénase par la *réduction de l'acétylène* et commence par un intéressant historique sur les étapes qui ont conduit à sa mise au point (17). Les autres chapitres (18, 19, 20) traitent de l'utilisation de la technique pour la mesure de la fixation dans des conditions écologiques et agronomiques.

La quatrième partie traite de la *biochimie de la fixation de l'azote* symbiotique et non symbiotique. Curieusement, le premier chapitre (21), sensé servir d'introduction, concerne en fait la sérologie et la structure antigénique des *Rhizobium*. Les chapitres suivants font le point sur l'état des connaissances sur la nitrogénase en 1973 : purification (23), propriétés et mécanismes d'action (24, 25, 29), le rôle de l'ATP (27, 28) et des réducteurs (26).

Le volume 7 (Fixation symbiotique) est divisé en cinq parties :

La première partie traite des *aspects génétiques* et de la taxonomie. Les trois premiers chapitres concernent les bactéries fixatrices libres et auraient dû être placés dans le volume 6. Les chapitres 4 à 8 sont consacrés à la génétique de *Rhizobium* : isolement de mutants et transfert génétique. On peut regretter que la génétique et l'amélioration des plantes hôtes, i. e. des légumineuses, ne soient pas abordées.

La seconde partie concerne la *qualité des inoculums pour Légumineuses* : la sélection des souches de *Rhizobium* (chapitres 11 et 12), la recherche de supports (13, 14), les techniques d'inoculation (15, 17) et quelques cas particuliers de réponse à l'inoculation (16, 17, 18).

La troisième partie est consacrée à des essais au champ visant à estimer la quantité d'azote fixé par les Légumineuses dans les conditions agronomiques et l'influence de l'inoculation. Un protocole expérimental défini par le PBI a été utilisé dans différents pays pour l'étude de la luzerne (19). D'autres chapitres relatent des essais réalisés sur les effets de l'inoculation et de l'apport d'engrais aux U. S. A. (20), en Irlande (25), Roumanie (22), à Cuba (23), en Egypte (24) et aux Indes (21).

La quatrième partie traite de *l'effet de différents facteurs du milieu* sur la fixation par les Légumineuses.

Les aspects généraux de la physiologie de la réaction au milieu de l'association symbiotique sont d'abord décrits en détail (27). Puis les effets particuliers de certains facteurs, dans des conditions physiologiques ou extrêmes, sont analysés : influence de la lumière et de la photosynthèse (30, 31), de la température (26, 28), de l'eau (30) et de l'azote combiné (29).

La cinquième partie regroupe les articles sur les symbioses autres que les Légumineuses. Elle commence par les résultats de l'enquête du PBI sur la formation de nodules racinaires chez les Angiospermes autres que les Légumineuses (32). Les aspects physiologiques (33, 35), cytologiques (34), écologiques de telles symbioses sont ensuite décrits.

Ce volume se termine par le résumé d'une table ronde sur les possibilités d'étendre la fixation d'azote à d'autres espèces végétales d'intérêt agronomique (41).

Table des matières de l'année 1977

A. BAILLE, Marie MERMIER. — Etude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet). I. — Evolution du trouble pendant le 1er semestre 1976 543

R. BLANCHET, N. GELFI, M. BOSC. — Relations entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux de soja (*Glycine Max.* L. *Merr.*) 261

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. I. — Etablissement des lois et vérifications expérimentales. 567

R. BONHOMME, C. VARLET GRANCHER, M. CHARTIER, P. ARTIS. — Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. IV. — Influence de l'âge et des éclairements passés sur le potentiel photosynthétique des feuilles cotylédonaires 159

R. CALVET. — Etude de la cinétique des phénomènes de dissolution en phase aqueuse. Application à la dissolution de l'atrazine 117

P. CHASSIN. — Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite-diols. II. — Influence des diols sur les propriétés d'hydratation de la montmorillonite 1

J. CHIAVERINI, R. GRAS. — *Note analytique.* Comparaison de quelques méthodes d'évaluation au laboratoire de la capacité au champ 445

P. CORNILLON. — Influence de la température du substrat sur la composition des racines et des limbes de tomate. Implications concernant l'absorption hydrique 277

P. CORNILLON. — Effets de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par la Tomate 409

Ph. COUCHAT. — Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols 477

F. A. DAUDET, G. VACHAUD. — La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. 503

J. DECAU, M. COMBRET, B. PUJOL. — Effets de fertilisations azotées de différents niveaux en rotation céréalière dans le Sud-Ouest de la France. I. — Production de grains et de protéines. 313

J. DEJOU, J. MORIZET. — Etude comparative de la dynamique du drainage et de la composition des eaux de percolation dans les sols granitiques et basaltiques du Massif Central. Résultats de 15 ans d'observation en cases de végétation dans les conditions climatiques du Bassin limagnais 335

J. FENECH, F. PAPY. — Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen : cas des cultures de céréales en sec au nord du Maroc 599

G. GILLY. — Désordres morphologiques, histologiques et chimiques provoqués par des carences minérales chez *Chrysanthemum morifolium* 637

G. GOSSE, A. PERRIER, B. ITIER. — Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien 521

R. GRAS, S. TROCMÉ. — Un essai d'entretien du sol en verger de pommiers 227

R. GUENNELON, B. CABIBEL. — Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols 489

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — *Note analytique.* Dosage par la méthode Kjeldahl des nitrates contenus dans les sols et les végétaux 329

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol. Etude au moyen de l'azote quinze 361

P. KAISER. — Sur l'épuration par le sol d'eaux résiduaires chargées en alcalilignine 291

B. LAGACHERIE, R. HUGOT, Noëlle AMARGER. — Sélection de souches de *Rhizobium japonicum* d'après leur compétitivité pour l'infection 379

H. LAUDELOUT, J. E. DUFEY. — Analyse numérique des expériences de lixiviation en sol homogène 65

J. F. LEDENT. — Relations entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité, chez diverses variétés de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.)..... 391

F. LEMAIRE. — Nouvelles observations sur l'appréciation de la fertilité des sols cultivés au moyen de l'expérimentation en petits vases de végétation..... 425

J. LE RENARD. — Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. I. — Aspects méthodologiques 651

J. LE RENARD, R. CALVET, Colette TOURNIER, Agnès HUBERT. — Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal dans un milieu poreux saturé..... 47

P. LOISEAU. — Morphologie de la touffe et croissance de *Nardus stricta* L. Influence de la pâture et de la fauche 185

J. MARCESSE. — Résultats d'une enquête sur les humidimètres à neutrons de profondeur utilisés en France (1976) 469

M. MINGEAU. — Porosité racinaire et tolérance à l'ennoyage 171

J. C. MULLER. — Minéralisation en sol de craie de l'azote organique des eaux résiduaires de féculerie 95

C. PERREY, A. VERGUET. — *Note technique.* Dispositif de mesure simultanée de la pluviométrie et de débits de réseaux expérimentaux de drainage 671

M. ROBELIN, J. C. MAUGET. — Comportement photosynthétique du noyer (*Juglans regia* L.). Premières observations sur un couvert continu obtenu à partir d'un semis haute densité.... 583

Séminaire sur les applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrogéologie. Cadarache, 16-18 novembre 1976 463-519

J. C. SIMON. — Etude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine. I. — Effets des brise-vent sur la croissance et le développement d'une culture type : la Vigne 75

J. C. SIMON, R. DELECOLLE. — Etude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine. II. Analyse expérimentale des dégâts causés par un vent accidentel (le Zonda) sur un verger de pruniers 215

Martine TERCÉ, R. CALVET. — Détermination par spectroscopie UV de la quantité d'herbicide contenue dans un extrait aqueux de sol. Application à l'étude de l'adsorption 661

Ch. VALANCOGNE, F. A. DAUDET. — Etude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier 137

Chroniques des livres 113, 561, 679

Contents of year 1977

A. BAILLE, Marie MERMIER. — Study of atmospheric turbidity a in semi-rural site (Montfavet). I. — Turbidity measurements during the first six months of 1976 543

R. BLANCHET, N. GELFI, M. BOSC. — Relationships between water consumption and production in various varietal type of soya bean (*Glycine Max.* L. *Merr.*) 261

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy. I. — Computation and comparison with experimental values..... 567

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER, M. CHARTIER, P. ARTIS. — Use of solar radiation by a crop of *Vigna sinensis*. IV. — Influence of age and light intensity on the photosynthesis of cotyledonar leaves 159

R. CALVET. — Kinetic study of dissolution phenomena in aqueous phases. Application to the dissolution of atrazine..... 117

P. CHASSIN. — Study of the interactions between calcium montmorillonite, water and diols. Hydration of the Montmorillonite-diol complexes. Part. II. — Influence of diols on the hydration characteristics of the montmorillonite 1

J. CHIAVERNI, R. GRAS. — *Analytical note.* Comparison of several methods of field capacity evaluation in laboratory..... 445

P. CORNILLON. — Influence of soil temperature on the composition of tomato roots and leaf blades. Consequences for water absorption 277

P. CORNILLON. — Effects of root temperature on the absorption of mineral elements by tomatoes 409

Ph. COUCHAT. — Methodological and technological bearings of soil moisture neutron meters.. 477

F. A. DAUDET, G. VACHAUD. — Neutronic measure of the water stock in soil. Application to determination of water balance..... 503

J. DECAU, M. COMBERT, B. PUJOL. — Effects of different quantities of nitrogen fertilisers in rotational cereal cropping in the South-West of France. 1. — Production of grains and proteins 313

J. DEJOU, J. MORIZET. — Comparative study about the dynamics of drainage and the composition of percolation water in granitic and basaltic soils in the Massif Central. Results of observations in vegetation boxes under the climatic conditions of the Limagne basin during 15 years..... 335

J. FENECH, F. PAPY. — Conditions necessary for a successful emergence under the mediterranean climate : case of the dry cereal culture Northwards of the Morocco..... 599

G. GILLY. — Morphological, histological and chemical disorders due to mineral deficiencies in *Chrysanthemum morifolium* 637

G. GOSSE, A. PERRIER, B. ITIER. — Study of the actual evapotranspiration of a wheat field in the Parisian region 521

R. GRAS, S. TROCMÉ. — Soil management trial in an apple orchard 227

R. GUENNELON, B. CABIBEL. — Diverse applications of the neutron method of humidity measuring for the control and utilization of the hydrous reserves of soils 489

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — *Analytical note.* The determination of nitrates in soils and plants by the Kjeldahl method 329

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — ^{15}N Study on mineralization and organization of nitrogen in the soil 361

P. KAISER. — About the purification of alkalilignin containing waste water by the soil 291

B. LAGACHERIE, R. HUGOT, Noëlle AMARGER. — Selection of *Rhizobium japonicum strains* on their competitiveness for infection 379

H. LAUDELOUT, J. E. DUFEY. — Numerical analysis of leaching experiments in homogeneous soil 65

J. F. LEDENT. — Relationships at maturity between culm yield and morphological characters within cultivars of winter wheat 391

F. LEMAIRE. — New observations concerning the cultivated soil fertility by means of experimentation in small vegetation containers 425

J. LE RENARD. — Description of a method for determinating the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in a homogeneous saturated porous medium. I. — Experimental method 651

J. LE RENARD, R. CALVET, Colette TOURNIER, Agnès HUBERT. — Measurement of the longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient in a saturated porous medium 47

P. LOISEAU. — Tuft morphology and *Nardus stricta* L. growth. Influence of grazing and mowing 185

J. MARCESSE. — Results on an investigation concerning depth neutron moisture gauges used in France (1976) 469

M. MINGEAU. — Root porosity and tolerance to water excess 171

J. C. MULLER. — Mineralization in chalk soil of the organic nitrogen contained in the waste waters of fecula works 95

C. PERREY, A. VERGUET. — *Technical note.* Device for the simultaneous measurement of the pluviometry and flow rates of experimental drainage systems 671

M. ROBELIN, J. C. MAUGET. — The photosynthetic behaviour of walnut (*Juglans regia* L.). First observations on a homogenous canopy obtained from a dense sowing 583

Seminar on the applications to neutronic measures in agronomy and hydrogeology. Cadarache, 16-18 novembre 1976 463-519

J. C. SIMON. — Study of windbreaks agronomic effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina .I. — Windbreak effects on growth and development of vines as a pattern culture 75

J. C. SIMON, R. DELECOLLE. — Study of windbreaks effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina .II. — Experimental study of damages induced by an accidental wind (the Zonda) on plum trees orchard 215

Martine TERCÉ, R. CALVET. — Determination of the amount of herbicide contained in a soil aqueous extract by UV spectroscopy 661

Ch. VALANCOGNE, F. A. DAUDET. — Study *in situ* of the water potential under a maize culture with a system of automatic measurement by a micropsychrometer with Peltier effect 137

Books reviews 113, 561, 679

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

l'Azote qui a eu lieu en septembre 1973 à Edimbourg. Malgré les longs délais de publication, ces deux livres constituent encore une base de référence intéressante parce qu'ils contiennent de nombreuses données agronomiques et écologiques provenant de différentes régions du globe.

Le volume 6 est divisé en quatre parties.

La première partie est constituée par des articles sur la fixation non symbiotique par les *bactéries* : physiologie et écologie dans les sols (chapitres 1, 2 et 5), fixation dans la rhizosphère des graminées tropicales (3) et du riz (4), fixation au niveau des feuilles (6), en association avec des plantes aquatiques (8) et avec d'autres micro-organismes (7).

La seconde partie traite de la fixation non symbiotique par des *algues bleues* : les aspects physiologiques (9, 10), les conditions écologiques et géographiques (11, 12, 13, 15, 16), et une fixation d'importance agronomique : le cas des rizières (14).

La troisième partie est consacrée à la technique de mesure de l'activité nitrogénase par la *réduction de l'acétylène* et commence par un intéressant historique sur les étapes qui ont conduit à sa mise au point (17). Les autres chapitres (18, 19, 20) traitent de l'utilisation de la technique pour la mesure de la fixation dans des conditions écologiques et agronomiques.

La quatrième partie traite de la *biochimie de la fixation de l'azote* symbiotique et non symbiotique. Curieusement, le premier chapitre (21), sensé servir d'introduction, concerne en fait la sérologie et la structure antigénique des *Rhizobium*. Les chapitres suivants font le point sur l'état des connaissances sur la nitrogénase en 1973 : purification (23), propriétés et mécanismes d'action (24, 25, 29), le rôle de l'ATP (27, 28) et des réducteurs (26).

Le volume 7 (Fixation symbiotique) est divisé en cinq parties :

La première partie traite des *aspects génétiques* et de la taxonomie. Les trois premiers chapitres concernent les bactéries fixatrices libres et auraient dû être placés dans le volume 6. Les chapitres 4 à 8 sont consacrés à la génétique de *Rhizobium* : isolement de mutants et transfert génétique. On peut regretter que la génétique et l'amélioration des plantes hôtes, i. e. des légumineuses, ne soient pas abordées.

La seconde partie concerne la *qualité des inoculums pour Légumineuses* : la sélection des souches de *Rhizobium* (chapitres 11 et 12), la recherche de supports (13, 14), les techniques d'inoculation (15, 17) et quelques cas particuliers de réponse à l'inoculation (16, 17, 18).

La troisième partie est consacrée à des essais au champ visant à estimer la quantité d'azote fixé par les Légumineuses dans les conditions agronomiques et l'influence de l'inoculation. Un protocole expérimental défini par le PBI a été utilisé dans différents pays pour l'étude de la luzerne (19). D'autres chapitres relatent des essais réalisés sur les effets de l'inoculation et de l'apport d'engrais aux U. S. A. (20), en Irlande (25), Roumanie (22), à Cuba (23), en Egypte (24) et aux Indes (21).

La quatrième partie traite de *l'effet de différents facteurs du milieu* sur la fixation par les Légumineuses.

Les aspects généraux de la physiologie de la réaction au milieu de l'association symbiotique sont d'abord décrits en détail (27). Puis les effets particuliers de certains facteurs, dans des conditions physiologiques ou extrêmes, sont analysés : influence de la lumière et de la photosynthèse (30, 31), de la température (26, 28), de l'eau (30) et de l'azote combiné (29).

La cinquième partie regroupe les articles sur les symbioses autres que les Légumineuses. Elle commence par les résultats de l'enquête du PBI sur la formation de nodules racinaires chez les Angiospermes autres que les Légumineuses (32). Les aspects physiologiques (33, 35), cytologiques (34), écologiques de telles symbioses sont ensuite décrits.

Ce volume se termine par le résumé d'une table ronde sur les possibilités d'étendre la fixation d'azote à d'autres espèces végétales d'intérêt agronomique (41).

plantes supérieures (cycles C_3, C_4, photorespiration, etc...), la production d'algues en milieu marin, les processus thermochimiques de traitement de la biomasse, par exemple, n'ont pas été évoqués.

Cet ouvrage s'inscrit dans la série des documents publiés récemment sur la contribution possible de la biologie à la couverture de nouveaux besoins (énergie, matière première). Il se caractérise dans cet ensemble par la qualité exceptionnelle sur le plan scientifique des articles retenus. Il ne permet pas, par contre, de se faire une idée globale suffisamment complète des efforts qui se développent actuellement sur le thème de la conversion biologique de l'énergie solaire. La qualité des articles impose néanmoins la présence de cet ouvrage dans toute bibliothèque soucieuse de réserver une place à ce thème.

Ph. C.

Proceedings of the 1st International Symposium on Nitrogen Fixation. Volumes 1 *et* 2. *Edités par* William E. NEWTON and C. J. NYMAN. Washington State University Press, 1976, 717 p.

Ces deux volumes contiennent les articles présentés lors d'un Symposium *interdisciplinaire* sur la fixation de l'azote qui s'est déroulé à Pullman (U. S. A.) en juin 1974.

Le volume 1 est divisé en deux parties : *chimie* et *enzymologie*.

L'azote moléculaire N_2 est un composé extrêmement peu actif. Sa liaison à des complexes contenant des métaux de transition lui confère une certaine réactivité. Les cinq premiers chapitres discutent de différentes approches visant à comprendre et améliorer la liaison de N_2 à de tels complexes contenant notamment du molybdène et leur réduction. Trois articles proposent ensuite des modèles concernant les mécanismes d'action de la nitrogénase.

Les deux derniers tiers du volume sont consacrés à l'enzymologie des nitrogénases préparées à partir de bactéries fixatrices libres ou symbiotiques et d'algues bleues. L'étude du rôle de la leghémoglobine dans la fixation symbiotique de N_2 et de l'existence d'une sous-unité commune, contenant du molybdène, entre nitrogénase et nitrate-réductase constitue les deux derniers chapitres. Ce volume est donc un ouvrage de référence pour les biochimistes et chimistes intéressés par la fixation de N_2 mais également pour tous ceux concernés par les enzymes métalliques, les processus de réduction enzymatique et les protéines sensibles à l'oxygène.

Le volume 2 est divisé en trois parties : *génétique, aspects agronomiques et écologiques*, et *intérêt des recherches actuelles du point de vue économique*.

Dans la section génétique, trois chapitres sont consacrés à l'étude des gènes *nif* (contrôlant la fixation de N_2) et de leur régulation chez des bactéries fixatrices libres : *Klebsiella pneumoniae* et *Azotobacter vinelandii* ; le rôle de la glutamine synthétase (enzyme jouant un rôle clef dans l'assimilation de NH_3^+) dans la régulation de la fixation est mise en évidence.

En ce qui concerne la symbiose *Rhizobium*-Légumineuse, un chapitre est consacré à l'étude génétique des plantes-hôtes : mise en évidence de gènes contrôlant la reconnaissance spécifique, la formation des nodules, et l'efficience fixatrice. Cinq chapitres sont consacrés à la génétique de *Rhizobium* : systèmes de transfert génétique, discussion du rôle éventuel de plasmides et rôle de la nitrate réductase.

Dans la section agronomique, sept chapitres sont consacrés aux symbioses obligatoires dont cinq à la symbiose *Rhizobium*-Légumineuses : les facteurs limitants de la fixation, le rôle de l'inoculation, le rôle de la photosynthèse, le transfert de l'azote fixé à la plante et l'obtention d'une symbiose à partir d'une culture de tissus.

Les chapitres suivants décrivent différentes associations entre des micro-organismes fixateurs de N_2 et des plantes autres que des Légumineuses : par exemple, *Rhizobium* avec *Trema*, des actinomycètes avec différents groupes d'arbres dont les aulnes par exemple, des algues bleues avec des fougères aquatiques du genre *Azolla*, des bactéries de la rhizosphère avec des graminés, par exemple, *Spirillum* avec des graminées fourragères ou *Beijerinckia* avec le riz. La communication sur l'association *Spirillum-Digitaria* avait eu un gros impact pendant le Symposium et a été à l'origine de nombreux travaux sur ce type d'association.

La dernière section regroupe cinq articles essayant d'analyser l'intérêt économique des recherches sur la fixation de l'azote : les besoins en azote, la production des engrais azotés, les problèmes d'énergie liés à l'agriculture, les impacts potentiels des recherches actuelles.

Ce second volume devrait être utile aux agronomes intéressés par le problème de l'azote, ou plus généralement, à tous ceux qui souhaitent en savoir plus sur les recherches actuelles dans le domaine de la fixation biologique de l'azote.

STEWARD W. D. P. — *Nitrogen fixation by free-living micro-organisms*, 1975, 471 p., PBI n° 6.

NUTMAN P. S. — *Symbiotic nitrogen fixation in plants*, 1976, 584 p., PBI n° 7, Cambridge University Press.

Ces deux volumes, publiés dans la série des ouvrages de synthèse du Programme Biologique International (PBI), constituent les comptes rendus d'un Symposium sur la Fixation biologique de

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — *Note analytique.* Dosage par la méthode Kjeldahl des nitrates contenus dans les sols et les végétaux 329

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol. Etude au moyen de l'azote quinze 361

P. KAISER. — Sur l'épuration par le sol d'eaux résiduaires chargées en alcalilignine 291

B. LAGACHERIE, R. HUGOT, Noëlle AMARGER. — Sélection de souches de *Rhizobium japonicum* d'après leur compétitivité pour l'infection 379

H. LAUDELOUT, J. E. DUFEY. — Analyse numérique des expériences de lixiviation en sol homogène 65

J. F. LEDENT. — Relations entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité, chez diverses variétés de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) 391

F. LEMAIRE. — Nouvelles observations sur l'appréciation de la fertilité des sols cultivés au moyen de l'expérimentation en petits vases de végétation 425

J. LE RENARD. — Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. I. — Aspects méthodologiques 651

J. LE RENARD, R. CALVET, Colette TOURNIER, Agnès HUBERT. — Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal dans un milieu poreux saturé 47

P. LOISEAU. — Morphologie de la touffe et croissance de *Nardus stricta* L. Influence de la pâture et de la fauche 185

J. MARCESSE. — Résultats d'une enquête sur les humidimètres à neutrons de profondeur utilisés en France (1976) 469

M. MINGEAU. — Porosité racinaire et tolérance à l'ennoyage 171

J. C. MULLER. — Minéralisation en sol de craie de l'azote organique des eaux résiduaires de féculerie 95

C. PERREY, A. VERGUET. — *Note technique.* Dispositif de mesure simultanée de la pluviométrie et de débits de réseaux expérimentaux de drainage 671

M. ROBELIN, J. C. MAUGET. — Comportement photosynthétique du noyer (*Juglans regia* L.). Premières observations sur un couvert continu obtenu à partir d'un semis haute densité 583

Séminaire sur les applications de la méthode neutronique en agronomie et en hydrogéologie. Cadarache, 16-18 novembre 1976 463-519

J. C. SIMON. — Etude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine. I. — Effets des brise-vent sur la croissance et le développement d'une culture type : la Vigne 75

J. C. SIMON, R. DELECOLLE. — Etude des influences agronomiques des brise-vent dans les périmètres irrigués du Centre-Ouest de l'Argentine. II. Analyse expérimentale des dégâts causés par un vent accidentel (le Zonda) sur un verger de pruniers 215

Martine TERCÉ, R. CALVET. — Détermination par spectroscopie UV de la quantité d'herbicide contenue dans un extrait aqueux de sol. Application à l'étude de l'adsorption 661

Ch. VALANCOGNE, F. A. DAUDET. — Etude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier 137

Chroniques des livres 113, 561, 679

Table des matières de l'année 1977

A. BAILLE, Marie MERMIER. — Etude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet). I. — Evolution du trouble pendant le 1er semestre 1976 543

R. BLANCHET, N. GELFI, M. BOSC. — Relations entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux de soja (*Glycine Max.* L. *Merr.*) 261

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. I. — Etablissement des lois et vérifications expérimentales. 567

R. BONHOMME, C. VARLET GRANCHER, M. CHARTIER, P. ARTIS. — Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. IV. — Influence de l'âge et des éclairements passés sur le potentiel photosynthétique des feuilles cotylédonaires 159

R. CALVET. — Etude de la cinétique des phénomènes de dissolution en phase aqueuse. Application à la dissolution de l'atrazine 117

P. CHASSIN. — Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite-diols. II. — Influence des diols sur les propriétés d'hydratation de la montmorillonite 1

J. CHIAVERINI, R. GRAS. — *Note analytique.* Comparaison de quelques méthodes d'évaluation au laboratoire de la capacité au champ 445

P. CORNILLON. — Influence de la température du substrat sur la composition des racines et des limbes de tomate. Implications concernant l'absorption hydrique 277

P. CORNILLON. — Effets de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par la Tomate 409

Ph. COUCHAT. — Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols 477

F. A. DAUDET, G. VACHAUD. — La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. 503

J. DECAU, M. COMBRET, B. PUJOL. — Effets de fertilisations azotées de différents niveaux en rotation céréalière dans le Sud-Ouest de la France. I. — Production de grains et de protéines. 313

J. DEJOU, J. MORIZET. — Etude comparative de la dynamique du drainage et de la composition des eaux de percolation dans les sols granitiques et basaltiques du Massif Central. Résultats de 15 ans d'observation en cases de végétation dans les conditions climatiques du Bassin limagnais 335

J. FENECH, F. PAPY. — Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen : cas des cultures de céréales en sec au nord du Maroc 599

G. GILLY. — Désordres morphologiques, histologiques et chimiques provoqués par des carences minérales chez *Chrysanthemum morifolium* 637

G. GOSSE, A. PERRIER, B. ITIER. — Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien 521

R. GRAS, S. TROCMÉ. — Un essai d'entretien du sol en verger de pommiers 227

R. GUENNELON, B. CABIBEL. — Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols 489

Contents of year 1977

A. BAILLE, Marie MERMIER. — Study of atmospheric turbidity a in semi-rural site (Montfavet). I. — Turbidity measurements during the first six months of 1976 543

R. BLANCHET, N. GELFI, M. BOSC. — Relationships between water consumption and production in various varietal type of soya bean (*Glycine Max.* L. *Merr.*) 261

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy. I. — Computation and comparison with experimental values..... 567

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER, M. CHARTIER, P. ARTIS. — Use of solar radiation by a crop of *Vigna sinensis*. IV. — Influence of age and light intensity on the photosynthesis of cotyledonar leaves 159

R. CALVET. — Kinetic study of dissolution phenomena in aqueous phases. Application to the dissolution of atrazine..... 117

P. CHASSIN. — Study of the interactions between calcium montmorillonite, water and diols. Hydration of the Montmorillonite-diol complexes. Part. II. — Influence of diols on the hydration characteristics of the montmorillonite 1

J. CHIAVERNI, R. GRAS. — *Analytical note.* Comparison of several methods of field capacity evaluation in laboratory..... 445

P. CORNILLON. — Influence of soil temperature on the composition of tomato roots and leaf blades. Consequences for water absorption 277

P. CORNILLON. — Effects of root temperature on the absorption of mineral elements by tomatoes 409

Ph. COUCHAT. — Methodological and technological bearings of soil moisture neutron meters.. 477

F. A. DAUDET, G. VACHAUD. — Neutronic measure of the water stock in soil. Application to determination of water balance..... 503

J. DECAU, M. COMBERT, B. PUJOL. — Effects of different quantities of nitrogen fertilisers in rotational cereal cropping in the South-West of France. 1. — Production of grains and proteins 313

J. DEJOU, J. MORIZET. — Comparative study about the dynamics of drainage and the composition of percolation water in granitic and basaltic soils in the Massif Central. Results of observations in vegetation boxes under the climatic conditions of the Limagne basin during 15 years..... 335

J. FENECH, F. PAPY. — Conditions necessary for a successful emergence under the mediterranean climate : case of the dry cereal culture Northwards of the Morocco..... 599

G. GILLY. — Morphological, histological and chemical disorders due to mineral deficiencies in *Chrysanthemum morifolium* 637

G. GOSSE, A. PERRIER, B. ITIER. — Study of the actual evapotranspiration of a wheat field in the Parisian region 521

R. GRAS, S. TROCMÉ. — Soil management trial in an apple orchard 227

R. GUENNELON, B. CABIBEL. — Diverse applications of the neutron method of humidity measuring for the control and utilization of the hydrous reserves of soils 489

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — *Analytical note.* The determination of nitrates in soils and plants by the Kjeldahl method 329

G. GUIRAUD, J. C. FARDEAU. — ^{15}N Study on mineralization and organization of nitrogen in the soil 361

P. KAISER. — About the purification of alkalilignin containing waste water by the soil 291

B. LAGACHERIE, R. HUGOT, Noëlle AMARGER. — Selection of *Rhizobium japonicum strains* on their competitiveness for infection 379

H. LAUDELOUT, J. E. DUFEY. — Numerical analysis of leaching experiments in homogeneous soil 65

J. F. LEDENT. — Relationships at maturity between culm yield and morphological characters within cultivars of winter wheat 391

F. LEMAIRE. — New observations concerning the cultivated soil fertility by means of experimentation in small vegetation containers 425

J. LE RENARD. — Description of a method for determinating the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in a homogeneous saturated porous medium. I. — Experimental method 651

J. LE RENARD, R. CALVET, Colette TOURNIER, Agnès HUBERT. — Measurement of the longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient in a saturated porous medium 47

P. LOISEAU. — Tuft morphology and *Nardus stricta* L. growth. Influence of grazing and mowing 185

J. MARCESSE. — Results on an investigation concerning depth neutron moisture gauges used in France (1976) 469

M. MINGEAU. — Root porosity and tolerance to water excess 171

J. C. MULLER. — Mineralization in chalk soil of the organic nitrogen contained in the waste waters of fecula works 95

C. PERREY, A. VERGUET. — *Technical note.* Device for the simultaneous measurement of the pluviometry and flow rates of experimental drainage systems 671

M. ROBELIN, J. C. MAUGET. — The photosynthetic behaviour of walnut (*Juglans regia* L.). First observations on a homogenous canopy obtained from a dense sowing 583

Seminar on the applications to neutronic measures in agronomy and hydrogeology. Cadarache, 16-18 novembre 1976 463-519

J. C. SIMON. — Study of windbreaks agronomic effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina .I. — Windbreak effects on growth and development of vines as a pattern culture 75

J. C. SIMON, R. DELECOLLE. — Study of windbreaks effects in irrigated areas of the Middle-West of Argentina .II. — Experimental study of damages induced by an accidental wind (the Zonda) on plum trees orchard 215

Martine TERCÉ, R. CALVET. — Determination of the amount of herbicide contained in a soil aqueous extract by UV spectroscopy 661

Ch. VALANCOGNE, F. A. DAUDET. — Study *in situ* of the water potential under a maize culture with a system of automatic measurement by a micropsychrometer with Peltier effect 137

Books reviews 113, 561, 679

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 6-1978

Dépôt légal : 2e trimestre 1978. N° d'impression : 25312

CPPAP n° 26017